

Dynamik von Personenströmen in Sportstadien

Sebastian Burghardt

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institute for Advanced Simulation (IAS)
Jülich Supercomputing Centre (JSC)

Dynamik von Personenströmen in Sportstadien

Sebastian Burghardt

Schriften des Forschungszentrums Jülich

IAS Series

Volume 18

ISSN 1868-8489

ISBN 978-3-89336-879-2

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek.
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Publisher and Distributor:	Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek 52425 Jülich Phone +49 (0) 24 61 61-53 68 · Fax +49 (0) 24 61 61-61 03 e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de Internet: http://www.fz-juelich.de/zb
Cover Design: Cover picture:	Jülich Supercomputing Centre, Forschungszentrum Jülich GmbH © Jan Ovelgönne
Printer:	Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH
Copyright:	Forschungszentrum Jülich 2013

Schriften des Forschungszentrums Jülich
IAS Series Volume 18

D 468 (Diss., Wuppertal, Univ., 2012)

ISSN 1868-8489
ISBN 978-3-89336-879-2

The complete volume is freely available on the Internet on the Jülicher Open Access Server (JUWEL) at
<http://www.fz-juelich.de/zb/juwel>

Persistent Identifier: [urn:nbn:de:0001-2013060504](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0001-2013060504)
Resolving URL: <http://www.persistent-identifier.de/?link=610>

Neither this book nor any part of it may be reproduced or transmitted in any form or by any
means, electronic or mechanical, including photocopying, microfilming, and recording, or by any
information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

Abstract

The design and dimensioning of escape routes in grandstands influence significantly the whole evacuation process of a football stadium. To analyze pedestrian traffic on grandstands, experiments under laboratory conditions with up to 300 participants have been performed in the ESPRIT arena in Düsseldorf. Fieldstudies in the same stadium and the BORUSSIA-PARK in Mönchengladbach complement the experimental database. In the first part of the dissertation an extensive literature review of pedestrian dynamics on stairs is presented. Precise trajectories, extracted from own experiments, are used to derive the fundamental diagram. The spatial dependency of the basic quantities velocity, density and specific flow on stairs is analyzed. Various influences on the flow and density in the mouth – standing and seated terraces, different slope of the grandstand, positioning of security personnel – are quantified in the second part of the thesis. Based on this data and gained insights the last chapter deals with the validation of a computersimulation. It is clarified, which aspects have to be considered for the validation of a spatial-continuous model. The comparison of the simulation results with experimental data allows conclusions about the correct approximation of reality.

Kurzfassung

Die Auslegung und Dimensionierung von Rettungswegen im Tribünenbereich beeinflusst maßgeblich den gesamten Räumungsprozess eines Fußballstadions. Um den Fußgängerverkehr auf Tribünen gezielt untersuchen zu können, wurden Experimente unter Laborbedingungen mit bis zu 300 Personen in der ESPRIT arena in Düsseldorf durchgeführt. Ergänzend fanden Feldstudien in demselben Stadion und dem BORUSSIA-PARK in Mönchengladbach statt. Im ersten Teil der Dissertation wird eine umfassende Literaturrecherche zur Fußgängerdynamik auf Treppen präsentiert. Basierend auf präzisen Trajektorien aus den eigenen Experimenten erfolgt die Herleitung des Fundamentaldiagramms. Die räumliche Abhängigkeit der Basisgrößen Geschwindigkeit, Dichte und spezifischer Fluss auf einer Treppe wird analysiert. Verschiedene Auswirkungen auf den Personenfluss und die Dichte im Mundloch – Steh- oder Sitzplatzbereich, unterschiedliche Tribünenneigung, Positionierung von Sicherheitspersonal – werden im zweiten Teil der Arbeit quantifiziert. Aufbauend auf dieser Datenbasis und den gewonnenen Erkenntnissen erfolgt im letzten Teil der Dissertation die Validierung einer Computersimulation. Es wird verdeutlicht welche Aspekte bei der Validierung eines raumkontinuierlichen Modells zu berücksichtigen sind. Der Vergleich von Simulationsergebnissen mit experimentellen Daten liefert Rückschlüsse auf die Realitätsnähe der verwendeten Software.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in den Fachgebieten «Baustofftechnologie und Brandschutz» und «Computersimulation für Brandschutz und Fußgängerverkehr» der Bergischen Universität Wuppertal.

Meine ersten Dankesworte gebühren meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. Armin Seyfried, der mich nicht nur in fachlichen Fragen umfassend betreute, sondern darüber hinausgehend immer ein offenes Ohr für mich hatte und in allen Angelegenheiten unterstützte. Herzlichen Dank für die äußerst lehrreiche Zeit und die menschliche Begleitung.

Ferner danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Wolfram Klingsch für die konstruktiven Fachgespräche während und nach meiner Zeit an seinem Lehrstuhl.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Professor Dr. Andreas Schadschneider für das dieser Arbeit entgegengebrachte Interesse und die wertvollen Hinweise.

Herrn Professor Dr.-Ing. Steffen Anders danke ich für die interessanten Gespräche und inspirierenden Gedankengänge eines außenstehenden Betrachters.

Ich bedanke mich bei Herrn Professor Dr. Joachim M. Marzinkowski für meine ersten Erfahrungen in der Forschung, die ich als studentische Hilfskraft an seinem Lehrstuhl machen durfte.

Meine Kollegen verdienen ein großes Dankeschön für die tatkräftige Unterstützung und das freundschaftliche Arbeitsklima. Besonders erwähne ich Dr.-Ing. Jun Zhang, Stefan Holl, Dr. Mohcine Chraibi, Andreas Meunders, Dr.-Ing. Ulrich Kemloh, Maik Boltes und Dr. Lukas Arnold. Das Arbeiten und die Zeit mit Euch haben mir immer sehr viel Freude bereitet!

Natürlich sollen meine Freunde nicht unerwähnt bleiben, die auf Ihre Art und Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Herzlichen Dank für Eure anspornenden Worte und Euer Verständnis in dieser arbeitsintensiven Zeit!

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mit großem Interesse meinen Werdegang wohlwollend begleitete, mir mit Verständnis und Liebe einen Ausgleich neben der Arbeit gab und meinen Mitteilungsdrang in Bezug auf diese Promotionsschrift ertragen hat.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau	2
1.3 Forschungsprojekt «HERMES»	3
2 Historische Entwicklung der Fußballstadien	5
2.1 Vom Vereinsplatz zur Multifunktionsarena	5
2.2 Historische Entwicklung der Besucherkapazität	9
2.3 Aktuelle Verordnungen und Normen	11
2.4 Vergleich von Ausgangsbreiten im Tribünenbereich	14
3 Methodik	19
3.1 Feldstudien und Experimente unter Laborbedingungen	19
3.2 Extrahieren von Trajektorien	20
3.3 Messmethoden	21
3.3.1 Makroskopische Analyse	21
3.3.2 Mikroskopische Analyse	23
3.3.3 Vergleich der Messmethoden	24
4 Leistungsfähigkeit von Treppen	27
4.1 Stand des Wissens	27
4.1.1 Planungshandbücher	28
4.1.1.1 Predtetschenski und Milinski: «Personenströme in Gebäuden»	28
4.1.1.2 Weidmann: «Transporttechnik der Fußgänger»	30
4.1.1.3 Nelson und Mowrer: «Emergency Movement»	32
4.1.1.4 Fruin: «Pedestrian Planning and Design»	34
4.1.1.5 Vergleich der Fundamentaldiagramme	36
4.1.2 Experimentelle Daten	39
4.2 Eigene Experimente	41
4.2.1 Aufbau und Geometrie	42
4.2.2 Feldstudien	46
4.2.3 Experimente unter Laborbedingungen	47
4.2.3.1 Stationärer Zustand	48
4.2.3.2 Fundamentaldiagramm	49
4.2.3.3 Kartendarstellung der Basisgrößen	51
4.3 Zusammenfassung	53

5 Fußgängerverkehr auf Tribünen	55
5.1 Einleitung	55
5.2 Unterschiedliche Personenführung auf Tribünen	56
5.3 Eigene Experimente	58
5.3.1 Experimente unter Laborbedingungen	59
5.3.1.1 Aufbau und Geometrie	59
5.3.1.2 Analyse	62
5.3.1.3 Unterschiedliche Tribünenneigung	64
5.3.1.4 Positionierung von Ordnern	65
5.3.1.5 Verhältnis der akkumulierten Breiten der Zuwege zur Ausgangs- breite	67
5.3.1.6 Unterschiedliche Startdichte	68
5.3.1.7 Personendichte im Mundloch	68
5.3.2 Feldstudien	69
5.3.2.1 ESPRIT arena in Düsseldorf	70
5.3.2.2 BORUSSIA-PARK in Mönchengladbach	72
5.4 Zusammenfassung	73
6 Validierung von Computersimulationen	77
6.1 Übersicht zu FDS+Evac	78
6.1.1 Bewegungsmodell der Agenten	79
6.1.2 Einstellungen	81
6.2 Simulation und Vergleich einfacher Geometrien	82
6.2.1 Korridor	83
6.2.1.1 Trajektorien	83
6.2.1.2 Fundamentaldiagramm	84
6.2.1.3 Kartendarstellung der Basisgrößen	85
6.2.2 T-Kreuzung	86
6.2.2.1 Trajektorien	86
6.2.2.2 Fundamentaldiagramm	87
6.2.2.3 Kartendarstellung der Basisgrößen	88
6.2.3 Ecke	90
6.2.3.1 Trajektorien	90
6.2.3.2 Fundamentaldiagramm	91
6.2.3.3 Kartendarstellung der Basisgrößen	92
6.3 Simulation und Vergleich ausgewählter Experimente auf der Tribüne	94
6.3.1 Unterrang	95
6.3.1.1 Experiment MU5	95
6.3.1.2 Experiment MU1	96
6.3.1.3 Experiment MU1v2	97
6.3.2 Oberrang	98
6.3.2.1 Experiment MO5	98
6.3.2.2 Experiment MO1	99
6.3.2.3 Experiment MO1v2	99
6.4 Zusammenfassung	100
7 Fazit und Ausblick	103
Literaturverzeichnis	111

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vom Experiment über die Analyse zur Computersimulation [1].	3
1.2	Schematische Darstellung des Evakuierungsassistenten [2].	4
2.1	Fußballspiel in Köln um 1900. Quelle: www.spiegel.de	6
2.2	Eintracht-Stadion in Braunschweig nach Fertigstellung der Tribüne im Jahre 1924. Quelle: www.eintracht.com	7
2.3	Kampfbahn Rote Erde in den 1930er Jahren [3].	7
2.4	Olympiastadion Berlin im Jahre 1936. Quelle: www.bpb.de	8
2.5	ESPRIT arena im Jahre 2012. Quelle: www.espritarena.de	8
2.6	Maximales Fassungsvermögen der Fußballstadien von 1888 bis heute.	10
2.7	Häufigkeitsverteilung der Spanne von Personen pro 0,6 m Modulbreite.	17
3.1	Benutzeroberfläche der Software PeTrack.	21
3.2	Schematische Darstellung der makroskopischen Messmethode und Foto von einer Feldstudie auf der Außentreppe.	22
3.3	Schematische Darstellung der Voronoi-Messmethode [4].	24
3.4	Vergleich der makroskopischen und mikroskopischen Messmethode.	25
4.1	Fundamentaldiagramme für Treppen nach Predtetschenski und Milinski [5].	30
4.2	Fundamentaldiagramme für Treppen nach Weidmann [6].	32
4.3	Fundamentaldiagramme für Treppen nach Nelson und Mowrer [7].	34
4.4	Fundamentaldiagramme für Treppen nach Fruin [8].	35
4.5	Vergleich der Fundamentaldiagramme aus Planungshandbüchern.	38
4.6	Experimentelle Messpunkte des Fundamentaldiagramms für Treppen.	40
4.7	Skizze der Außentreppe und extrahierter Trajektoriensatz aus dem Experiment T1.	44
4.8	Oberrang der ESPRIT arena mit Visualisierung des Messfeldes A_m und Skizzierung der parabelförmigen Treppe.	45
4.9	Fundamentaldiagramme der Außentreppe und zeitliche Entwicklung des spezifischen Flusses.	47
4.10	Manuelle Auswahl des stationären Zustands anhand des $N(t)$ -Diagramms sowie Zeitreihen der Dichte und Geschwindigkeit.	49

4.11 Vergleich der Fundamentaldiagramme Außentreppe, Tribünentreppe Ober- und Unterrang.	51
4.12 Kartendarstellungen der Experimente auf der Außentreppe.	53
5.1 Tribünen-Design der Szenarien 1 bis 3.	58
5.2 Darstellung der Tribüne im Oberrang.	60
5.3 Detailansicht der Trajektorien (2-dimensional) aus Experiment MU1v2 im Mundloch. Die genutzten Messlinien (ML) sind visualisiert.	62
5.4 Gegenüberstellung der realen Durchtrittszeiten mit den mittleren Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie des Experiments MU1v2.	63
5.5 Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie des Experiments MU1v2 und Markierung des Zeitintervalls zur Berechnung des Personenflusses.	64
5.6 Durchtrittszeiten an den Austritts-Linien der Experimente 1 und 1v2 im Unter- und Oberrang.	65
5.7 Vergleich von Durchtrittszeiten und Nahaufnahme der Trajektorien im Mundloch.	66
5.8 Zeitlicher Verlauf der Dichten im Mundloch gemessen in den Experimenten MU1v2 und MO1v2.	69
5.9 Durchtrittszeiten und zeitlicher Verlauf der Dichte sowie des spezifischen Flusses während der Feldversuche in der ESPRIT arena.	71
5.10 Durchtrittszeiten und zeitlicher Verlauf der Dichte sowie des spezifischen Flusses während der Feldversuche im BORUSSIA-PARK.	73
6.1 Geometrische Darstellung eines Agenten mit drei roten überlappenden Kreisen, die eine Ellipse annähern in FDS+Evac [9].	80
6.2 Fundamentaldiagramm für einen Korridor basierend auf Messwerten aus fünf Simulationen mit FDS+Evac.	83
6.3 Visualisierung der extrahierten Trajektorien für einen Korridor aus FDS+Evac und einem Experiment.	84
6.4 Flussprofil für einen Korridor in FDS+Evac.	84
6.5 Vergleich des Fundamentaldiagramms für einen Korridor von FDS+Evac mit einem Experiment. Der experimentelle Datensatz ist entnommen aus [4].	85
6.6 Kartendarstellung der Kenngrößen für einen Korridor.	86
6.7 Visualisierung der extrahierten Trajektorien für eine T-Kreuzung aus FDS+Evac und einem Experiment.	87
6.8 Flussprofil für eine T-Kreuzung in FDS+Evac.	87
6.9 Vergleich des Fundamentaldiagramms für eine T-Kreuzung von FDS+Evac mit einem Experiment. Der experimentelle Datensatz ist entnommen aus [4].	88
6.10 Kartendarstellung der Kenngrößen für eine T-Kreuzung.	89
6.11 Visualisierung der extrahierten Trajektorien für eine Ecke aus FDS+Evac und einem Experiment.	90
6.12 Flussprofil für eine Ecke in FDS+Evac.	91

6.13 Vergleich des Fundamentaldiagramms für eine Ecke von FDS+Evac mit einem Experiment. Der experimentelle Datensatz ist entnommen aus [10].	92
6.14 Kartendarstellung der Kenngrößen für eine Ecke.	93
6.15 Darstellung der Tribüne im Unterrang mit Smokeview.	94
6.16 Vergleich von Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie und der Dichte im Mundloch des Experiments MU5 und FDS+Evac.	95
6.17 Vergleich von Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie und der Dichte im Mundloch des Experiments MU1 und FDS+Evac.	96
6.18 Vergleich von Durchtrittszeiten an den Eintritts-Linien und der Dichte im Mundloch des Experiments MU1v2 und FDS+Evac.	97
6.19 Vergleich von Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie und der Dichte im Mundloch des Experiments MO5 und FDS+Evac.	98
6.20 Vergleich von Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie und der Dichte im Mundloch des Experiments MO1 und FDS+Evac.	99
6.21 Vergleich von Durchtrittszeiten an den Eintritts-Linien und der Dichte im Mundloch des Experiments MO1v2 und FDS+Evac.	100

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich von neun deutschen Fußballstadien [11].	16
3.1	Vergleich der elementaren Größen auf makro- und mikroskopischer Ebene. . . .	25
4.1	Zusammenstellung der unterschiedlich beanspruchten Flächen f [5].	29
4.2	Faktoren für die Berechnung der Geschwindigkeit nach Nelson und Mowrer. . .	33
4.3	Größen der ungenutzten Wegbreiten nach Nelson und Mowrer	33
4.4	Vergleich der Notationen in den Handbüchern mit Umrechnungsfaktoren. . . .	37
4.5	Überblick der in den Handbüchern veröffentlichten Kenngrößen des Fundamen- taldiagramms für Treppen.	37
4.6	Anhand der experimentellen Daten abgeschätzte Bereiche für die Basiskenngrößen.	41
4.7	Informationen zu den Messwerten in Abbildung 4.6.	41
4.8	Randbedingungen für das Experiment «Treppe abwärts».	43
5.1	Beschreibung der Tribünenexperimente.	61
5.2	Übersicht der durchgeführten Feldversuche auf Tribünen.	69
6.1	Übersicht der fünf vordefinierten Personengruppen in FDS+Evac.	80

Kapitel 1

Einleitung

«Viermal die rote Karte» – so lautete die Überschrift eines Berichtes der Stiftung Warentest [12] im Vorfeld der Fußball-Weltmeisterschaft 2006 in Deutschland. Bewertet wurde die Sicherheit in zwölf deutschen Stadien, die trotz immenser Investitionen erhebliche Sicherheitsmängel aufzuweisen schienen. Hauptkritikpunkt war die Dimensionierung und Führung der Rettungswege. Die getroffenen Gesamtbewertungen sind mit Vorsicht zu interpretieren, weil detaillierte Bewertungskriterien nicht beschrieben werden und damit nicht nachvollziehbar sind. Alle untersuchten Stadien besitzen eine baurechtliche Genehmigung; folglich erfüllen die entsprechenden Rettungswege das geforderte Schutzziel, und dieser Artikel deutet indirekt auf Mängel des deutschen Bauordnungsrechts hin.

Das führt zu der Frage, wie Rettungswege in Stadien optimal dimensioniert und gestaltet werden sollten, um eine sichere Räumung zu gewährleisten und die Dauer der Evakuierung zu minimieren. Die Forschung im Bereich der Fußgängerdynamik bietet diesbezüglich einen neuen Ansatz. Ziel dieser kontinuierlich an Bedeutung gewinnenden Forschungsdisziplin ist es, den Fußgängerverkehr zu quantifizieren und ein besseres Verständnis bezüglich des Verhaltens von Menschenmassen zu gewinnen.

1.1 Motivation

Anhand der Muster-Versammlungsstättenverordnung [13] kann verdeutlicht werden, dass tatsächlich Änderungsbedarf besteht. Nach dieser Verordnung werden Rettungswegbreiten in Abhängigkeit der darauf angewiesenen Personenzahl festgelegt, und eine Verbreiterung ist nur in vordefinierten Modulbreiten gestattet. Die schrittweise Verbreiterung basiert auf der Idee, dass eine Erhöhung des Personenflusses nur möglich ist, wenn eine neue Linie ausgebildet werden kann. Aktuelle Forschungsergebnisse widerlegen diese Annahme und zeigen, dass der Fluss linear mit der Korridorbreite ansteigt [14, 15]. Einen weiteren Kritikpunkt bietet die vorgegebene

gleiche Bemessung der Breite von Treppen und horizontalen Fluren als Teil eines Rettungsweges. Messergebnisse belegen, dass unterschiedliche Geometrien (Flur, Ecke, T-Kreuzung, Treppe) gleicher Breite verschiedene Kapazitäten erlauben [4, 16–18]. Diese Erkenntnisse führen zu der Schlussfolgerung, dass nur differenzierte Vorgaben zu einer effizienten Dimensionierung von Rettungswegen führen können.

Für Sonderbauten – wie Sportstadien – ist teilweise eine direkte Umsetzung der gesetzlichen Vorgaben nicht möglich. In diesem Fall muss die ausreichende Dimensionierung der Rettungswege mit einem anerkannten Ingenieurverfahren nachgewiesen werden. Dieser Nachweis kann sowohl mit einer manuellen Berechnung (Handrechenverfahren) oder mit einer computergestützten Simulation erfolgen. Bei der Verwendung einer Computersimulation ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse nur so gut sein können wie das Modell, auf denen sie basieren. In [19] wurden vier kommerzielle Programme miteinander verglichen. Die prognostizierten Räumungszeiten für einen Korridor unterscheiden sich um einen Faktor bis zu vier.

Die signifikanten Unterschiede der simulierten Räumungszeiten deuten darauf hin, dass der Validierung von Computersimulationen bislang wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass in der Vergangenheit aufgrund einer geringen experimentellen Datenbasis die Validierung nur begrenzt möglich war, weil Referenzwerte für einen direkten Vergleich von Simulation und Realität fehlten. Häufig konnten nur Gesamträumungszeiten eines Gebäudes als Kriterium herangezogen werden. Zukünftig muss jedoch das Ziel eines anerkannten Ingenieurverfahrens in Form einer Computersimulation sein, die Dynamik von Fußgängern in jedem Anlagenteil (Treppe, Tür, Flur etc.) richtig darzustellen. Dadurch sollte neben einer realitätsnahen Gesamträumungszeit auch die richtige Vorhersage von Staubereichen in einem gegebenen Szenario möglich sein.

1.2 Zielsetzung und Aufbau

Diese Dissertation ist im Rahmen des Forschungsprojektes HERMES (siehe Kapitel 1.3) entstanden. Es werden drei Ziele verfolgt. Das erste Ziel ist die quantitative Beschreibung der Fußgängerbewegung auf Treppen in Form eines Fundamentaldiagramms. Bis heute ist die empirische Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Dichte, sogar die Form des Fundamentaldiagramms, nicht komplett verstanden. Diese Kenntnis ist jedoch für eine sicherheitsgerechte Abschätzung von Räumungszeiten notwendig, weil Treppen als Teil des Rettungsweges – in Fußballstadien gleichermaßen wie in Hochhäusern oder U-Bahnhöfen – berücksichtigt werden müssen. Das zweite Ziel ist die detaillierte Analyse des Fußgängerverkehrs auf Tribünen. Durch die Quantifizierung verschiedener Einflussgrößen sollen Optimierungspotenziale für eine Räumung im Gefahrenfall aufgezeigt werden. Ebenfalls wird die Muster-Versammlungsstättenverordnung bezüglich der Vorgaben zur Auslegung von Rettungswegen kritisch hinterfragt. Ziel Nummer drei ist ein weiterer Beitrag zur Validierung des «Fire Dynamics Simulator with Evacu-

ation» (FDS+Evac). Im Bereich der Brandsimulation ist dieses Programm weit verbreitet, und den Anwendern des Evakuierungsmoduls soll verdeutlicht werden, wie realitätsnah Szenarien reproduziert werden können und wo die Grenzen des Modells liegen.

Kapitel 2 beschreibt die historische Entwicklung der Fußballstadien. Es wird gezeigt, wie sich Fußballstadien bezüglich der Bauart und dem Fassungsvermögen mit der Zeit verändert haben. Aktuelle Verordnungen und Normen, welche die Auslegung von Rettungswegen beeinflussen, werden vorgestellt. Kapitel 3 beschreibt die angewandte Methodik. Es wird erklärt, welche Möglichkeiten Feldstudien und Experimente unter Laborbedingungen bieten und welche Messmethoden zur Auswertung genutzt werden. Die Analyse der Leistungsfähigkeit von Treppen findet in Kapitel 4 statt. Das Kapitel beginnt mit einer umfangreichen Literaturrecherche. Daran schließt sich die Vorstellung und Auswertung eigener Experimente an. Kapitel 5 fokussiert auf den Fußgängerverkehr auf Tribünen. Es werden unterschiedliche Personenführungen auf Tribünen vorgestellt und der Personenfluss sowie die Dichte im Ausgang gemessen. Äußere Faktoren, die Einfluss auf diese beiden Basisgrößen nehmen, wie bspw. die Tribünenneigung oder die Positionierung von Ordnern, werden mit Hilfe von eigenen Experimenten quantifiziert. Kapitel 6 beschreibt die Validierung von FDS+Evac mittels experimenteller Daten. Die Grundlagen des kraftbasierten Modells sowie die genutzten Einstellungen werden erläutert. Im Anschluss erfolgt eine Reproduktion ausgewählter Experimente mit FDS+Evac und ein Vergleich mit experimentellen Daten. Fazit und Ausblick befinden sich in Kapitel 7.

Abbildung 1.1 beschreibt die grundlegende Vorgehensweise dieser experimentell ausgelegten Arbeit kurz und prägnant. Im ersten Schritt wurden für den Aufbau einer Datenbasis gezielt Fußgängerexperimente durchgeführt. Schritt zwei zeigt die mikroskopische Analyse dieser Experimente und im letzten Schritt die Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse zur Validierung der Computersimulation.

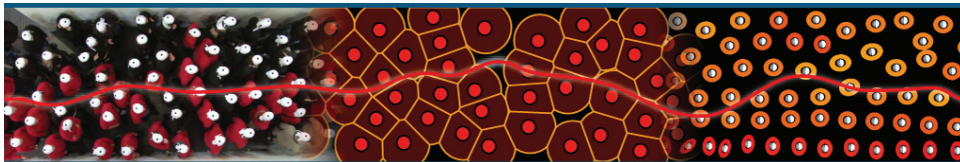


Abbildung 1.1: Vom Experiment über die Analyse zur Computersimulation [1].

1.3 Forschungsprojekt «HERMES»

Das Forschungsprojekt HERMES [2, 20] wurde im Themenfeld «Schutz und Rettung von Menschen» vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. HERMES war im Rahmen der deutschen Hightech-Strategie in das Programm «Forschung für die zivile Sicherheit» eingebettet. Im Dezember 2011 ist das Projekt erfolgreich abgeschlossen worden.

Ziel des Verbundprojektes war es, die Sicherheit der Personen bei Großveranstaltungen zu optimieren. Dazu wurde ein Evakuierungsassistent entwickelt, welcher die Entscheidungsträger (Betreiber, Sicherheitsdienst, Polizei und Feuerwehr) durch frühzeitige Stauprognosen unterstützt, die aktuelle Lage richtig einzuschätzen und somit das Sicherheitspersonal sowie Rettungskräfte bestmöglich zu koordinieren.

Es wurden Fußgängerexperimente in der ESPRIT arena Düsseldorf mit bis zu 300 Probanden durchgeführt und Basisgrößen der Fußgängerdynamik ermittelt. Darauf basierend ist eine Computersimulation entwickelt worden, dessen Simulationskern an das Gefahrenmanagementsystem gekoppelt ist und durch eine Personenzählung mittels automatisierter Bildverarbeitung mit Informationen über die Besucherverteilung im Stadion versorgt wird (siehe Abbildung 1.2). Durch den Einsatz eines Parallelcomputers können so Simulationen basierend auf der aktuellen Gefahrenlage schneller als Echtzeit durchgeführt werden und Prognosen bezüglich der Bewegung aller anwesenden Personen für die nächsten 15 Minuten erstellt werden. Die Simulationsergebnisse werden den Anwendern grafisch über ein Kommunikationsmodul zur Verfügung gestellt.

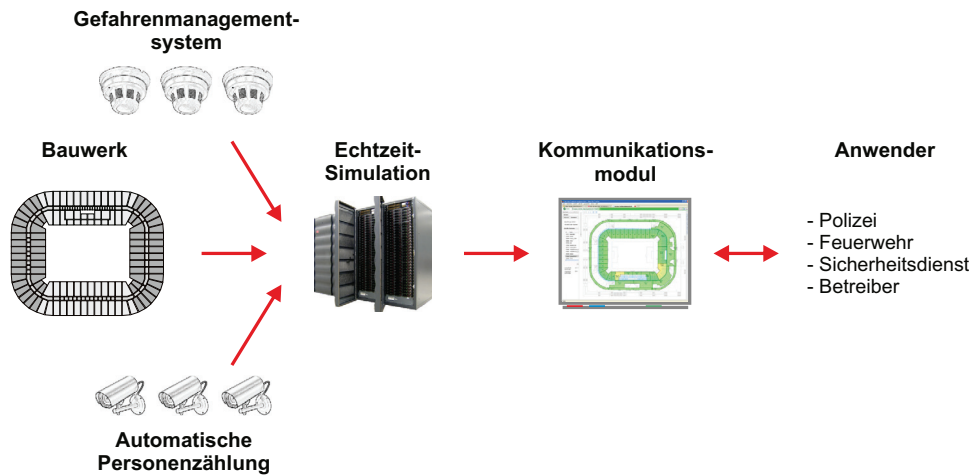


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung des Evakuierungsassistenten [2].

Kapitel 2

Historische Entwicklung der Fußballstadien

Bereits im Altertum wurden die ersten Sportstadien gebaut. Bei den ersten olympischen Spielen, welche 776 v. Chr. im heiligen Hain von Olympia stattfanden, nutzte man Erdwälle, um den Zuschauern eine möglichst gute Sicht auf das Spielfeld zu ermöglichen [21, 22]. Das Amphitheatrum Flavium in Rom – auch bekannt als Kolosseum – ist zwischen 72 und 80 n. Chr. erbaut worden und bot als größter geschlossener Bau der römischen Antike bereits Platz für bis zu 73.000 Besucher [23].

Nachfolgend wird die historische Entwicklung deutscher Fußballstadien aufgezeigt. Diese haben sich im Laufe der Zeit aufgrund unterschiedlicher Einflussfaktoren in Form, Größe, Verwendungszweck sowie Besucherkapazität verändert. Anschließend wird auf die heute geltenden baurechtlichen Vorschriften eingegangen, welche bei der Planung eines Stadions, bezogen auf die Auslegung und Dimensionierung von Rettungswegen, berücksichtigt werden müssen. In Kapitel 2.4 werden deutsche Bundesligastadien, bezogen auf die pro Besucher verfügbare Ausgangsbreite, verglichen.

2.1 Vom Vereinsplatz zur Multifunktionsarena

Mit der Gründung des Deutschen Fußball-Bundes e. V. (DFB) im Jahr 1900 wurde die Mannschaftssportart «Fußball», die ihren Ursprung in England hat, in Deutschland immer populärer. Die Folge war eine Gründung von zahlreichen Fußballvereinen im ganzen Land, angefangen beim Fußballspiel als Breitensport bis hin zum Spitzensport als Wirtschaftsprodukt.

Mittlerweile hat die Sportart Fußball auch ökonomisch eine große Bedeutung, beispielsweise wurde für die Fußball-Weltmeisterschaft 2006 in Deutschland vom Staat und den Stadion-

betreiben insgesamt rund 1,4 Milliarden Euro in den Bau und die Erweiterung von WM-Austragungsstätten investiert [12].

In dem Buch «Das große Buch der deutschen Fußball-Stadien» [3] wird die Geschichte und Entwicklung deutscher Stadien umfassend dargestellt. Nach dem Autor Werner Skrentny lassen sich an deutschen Stadien ganze Zeitphasen ablesen, die alle ihre eigenen baulichen Eigenschaften aufweisen und eine klare Entwicklung zur multifunktionalen High-Tech-Arena aufzeigen.

Der klassische Vereinsplatz der 1900er Jahre bestand aus einer Rasenfläche mit zwei einfachen Fußballtoren, die das Spielfeld darstellten (siehe Abbildung 2.1). Oftmals fanden die Spiele



Abbildung 2.1: Fußballspiel in Köln um 1900. Quelle: www.spiegel.de

auch in Parkanlagen statt; die Publikumsanzahl war klein. Mit den Jahren wuchs das Interesse der Menschen an der Sportart und die Zuschauerzahlen bei Fußballspielen stiegen an. Eine Umzäunung des Platzes war Voraussetzung zum Aufstieg in die Bezirksklasse und ermöglichte die Einnahme von Eintrittsgeldern. Diese Einnahme stellte bald einen wichtigen Teil zur Finanzierung der Vereine dar. Bei Fußballspielen standen die Zuschauer ebenerdig um das Spielfeld verteilt, teilweise waren bereits Erdwälle aufgeschüttet und eine überdachte Holztribüne galt als «Luxus» (siehe Abbildung 2.2). Beginnend im Jahr 1920 wurden in ganz Deutschland Volksstadion und Volksparks errichtet. Bei der Planung und dem Bau lag ein besonderes Augenmerk darauf, diese Sportstätten so auszulegen, dass viele Sportarten darin Platz finden. Dazu benötigte das Volksstadion eine große Rasenfläche, eine Rundrennbahn sowie Platz für weitere Sportbereiche im Inneren. Für die Zuschauer wurden Tribünen mit Terrassenstufen um die Rennbahn herum errichtet, welche meistens als Stehplatztribünen ausgelegt und teilweise überdacht waren (siehe Abbildung 2.3). Zu Beginn der nationalsozialistischen Diktatur wurden viele monumentale Stadien, auch Kampfbahnen genannt, wie das Olympiastadion Berlin-Charlottenburg errichtet (siehe Abbildung 2.4). Das damals größte Stadion der Welt entstand 1936 auf dem Reichssportfeld, und die «Nazi-Spiele» sowie deren Architektur dienten vorrangig der Propaganda und Prestige-Maximierung, welche den Sport in den Hintergrund rücken



Abbildung 2.2: Eintracht-Stadion in Braunschweig nach Fertigstellung der Tribüne im Jahre 1924. Quelle: www.eintracht.com



Abbildung 2.3: Kampfbahn Rote Erde in den 1930er Jahren [3].

ließen. Nach Kriegsende 1945 wurden vielerorts die zerstörten Stadien wieder notdürftig repariert; es entstanden die sogenannten «Trümmerstadien». Darüber hinaus baute man aus dem Schutt der zerbombten Städte komplett neue Stadien auf, die zum Symbol des Wiederaufbaus wurden. Durch die Einführung der Bundesliga 1963 gab es erste Vorschriften für den Bau und Betrieb von Stadien in Westdeutschland. Der DFB schrieb ein Fassungsvermögen von mindestens 35.000 Plätzen und eine Flutlichtanlage vor. Die Vergabe der Fußball-Weltmeisterschaft 1974 an Deutschland brachte die nächsten großen Veränderungen mit sich. Es flossen öffentliche Gelder vom Bund, den Ländern, den Städten und auch die ZDF-Glücksspirale investierte. Das Gesamtvolumen belief sich auf fast 500 Mio. DM und war für den Neubau sowie Ausbau der WM-Stadien notwendig, weil die FIFA (frz. Fédération Internationale de Football Asso-



Abbildung 2.4: Olympiastadion Berlin im Jahre 1936. Quelle: www.bpb.de.

ciation) ein Fassungsvermögen von 60.000 Besuchern forderte. Diese Entwicklung hatte auch Auswirkungen auf die Präsenz von Fußballereignissen in den Medien.

Seit der Jahrtausendwende ist ein Trend zu sogenannten «Multifunktionsarenen» sichtbar. Durch ein komplett schließbares Dachsystem, beheizbare Tribünenbereiche, austauschbare Bodenbeläge, VIP-Lounges sowie die Vermietung von Konferenzräumen und Hotelzimmern können diese Arenen vielseitig genutzt werden und sind wirtschaftlich effizienter zu betreiben (siehe Abbildung 2.5). Trotz der vielfach guten Ausstattung der deutschen Stadien waren vor



Abbildung 2.5: ESPRIT arena im Jahre 2012. Quelle: www.espritarena.de.

der Fußballweltmeisterschaft 2006 bei den meisten Austragungsstätten Umbauten notwendig, um die aktuellen FIFA-Vorgaben von 60.000 Sitzplätzen zu erfüllen. Bei der vorletzten WM in Deutschland im Jahr 1974 war noch eine Kombination aus Steh- und Sitzplätzen erlaubt.

2.2 Historische Entwicklung der Besucherkapazität

Die bauliche Entwicklung deutscher Fußballstadien lässt vermuten, dass es einen Trend zu immer größeren (bezogen auf die Anzahl von Zuschauerplätzen) Fußballstadien gibt. Um diese Vermutung abzusichern, werden in diesem Kapitel 289 deutsche Fußballstadien von 1888 bis heute, bezogen auf deren Fassungsvermögen und Eröffnungsjahr, verglichen (in Anlehnung an [11]). Als Datengrundlage dient das Buch «Das große Buch der deutschen Fußballstadien» [3] von Werner Skrentny, in dem er Geschichte, Architektur und Mythos der 289 wichtigsten Fußballstadien in Deutschland zusammenfasst. Ebenfalls wird ein Bezug zu den 10 größten Stadien der Welt hergestellt.

In Abbildung 2.6 ist mit Kreisen die maximale Besucherkapazität seit Bestehen der 289 deutschen Fußballstadien gegen das Eröffnungsjahr aufgetragen. Aufgrund der vielen Datensätze kommt es teilweise zur Überschneidung von Punkten. Die 10 größten deutschen Fußballstadien mit aktueller Besucherkapazität (Stand: August 2012) sind als Quadrate dargestellt (siehe Abbildung 2.6). Diese Sportstätten sind bereits in der Sammlung der 289 Fußballstadien enthalten, jedoch ist es möglich, dass die aktuelle Kapazität von der damaligen abweicht. Beispielsweise hatte das Olympiastadion Berlin zur Eröffnung ein Fassungsvermögen von 100.000 Zuschauern, heute jedoch «nur» noch 74.244 Plätze. Die weltweit 10 größten Fußballstadien sind als Dreiecke abgebildet. Größtes Stadion der Welt mit 220.000 Plätzen ist das Strahov-Stadion in Prag. Da diese Veranstaltungsstätte heute nur noch bedingt für Sportveranstaltungen genutzt wird, findet sie in dieser Zusammenstellung keine Berücksichtigung.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts ist die Anzahl von Fußballstadien in Deutschland gering. Darauf folgte bis zum Beginn des 1. Weltkrieges eine Bauphase, in der Fußballstadien mit bis zu 40.000 Zuschauerplätzen errichtet wurden. Nach 1918 setzte sich diese Bauphase bis zum 2. Weltkrieg fort. Es entstanden mehrere große Fußballstadien mit einem Fassungsvermögen von mehr als 40.000 Sitz- und Stehplätzen. In der NS-Zeit wurden die bis dato größten deutschen Stadien gebaut: das Olympiastadion Berlin mit einer Kapazität von 100.000 Zuschauerplätzen und das Deutsche Stadion in Nürnberg mit Platz für 405.000 Personen, welches jedoch nie fertiggestellt wurde. Während des 2. Weltkrieges entstanden nahezu keine neuen Sportstätten. Nach Kriegsende boomte der Stadionbau noch einmal für einige Jahre, bis der Bedarf landesweit gedeckt war. In Vorbereitung auf die olympischen Spiele 1972 und die Fußball-WM 1974 wurden drei entsprechend ausgelegte Stadien gebaut: Olympiastadion München 1972, Parkstadion Gelsenkirchen 1974 und Westfalenstadion Dortmund 1974. Die Folgejahre bis zur WM 2006 waren durch eine Flaute im Stadionbau gekennzeichnet.

Die Vermutung, dass es einen Trend zu immer größeren Fußballstadien gibt, kann nicht belegt werden. Eröffnet wurden die größten deutschen Stadien zumeist vor 1974 und nicht in den letzten Jahren. Durch Umbauten änderte sich häufig die Kapazität der Stadien. So hat sich in 111 der deutschen Stadien (41 %) das Fassungsvermögen im Laufe der Zeit verkleinert, 8 Stadien

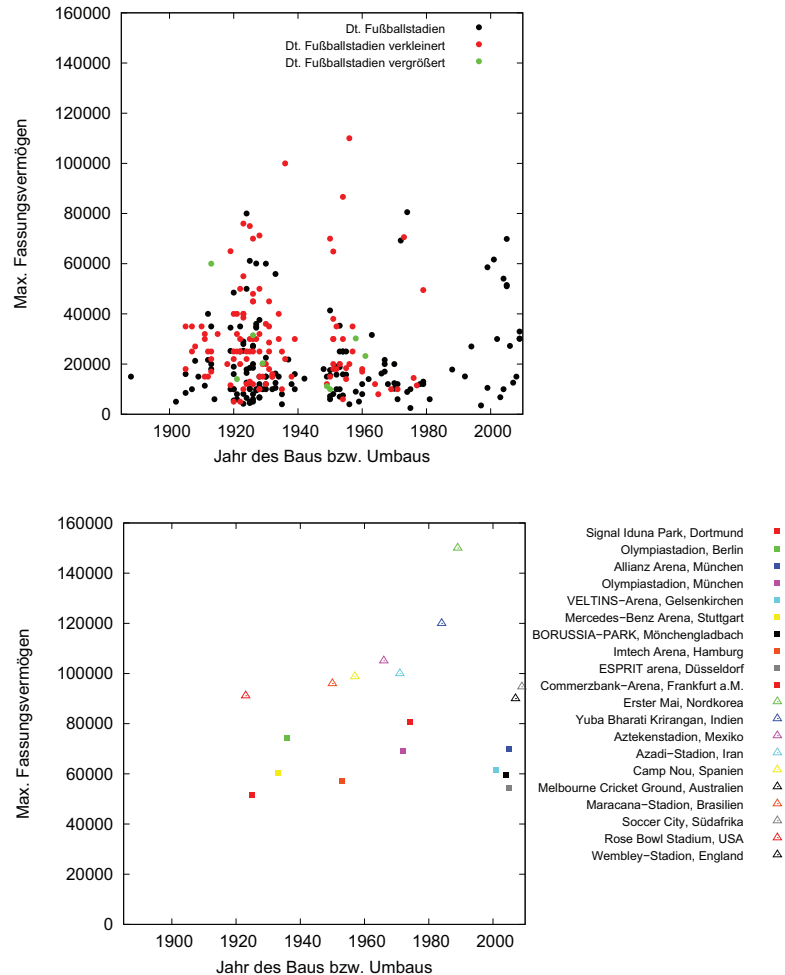


Abbildung 2.6: Maximales Fassungsvermögen der Fußballstadien von 1888 bis heute. Kreise stellen die 289 wichtigsten Fußballstadien nach Skrentny [3] dar: rot = Kapazitätsreduzierung, grün = Kapazitätserweiterung und schwarz = keine Information bezüglich Kapazitätsveränderung. Die zehn größten deutschen Sportstätten sind mit Quadraten und die weltweit zehn größten Fußballstadien mit Dreiecken dargestellt (Stand: August 2012).

(3 %) wurden vergrößert und zu den übrigen Stadien (56 %) liegen keine Informationen vor. Hauptgründe für die Reduzierung der Besucherkapazität sind:

- Sinkendes Interesse an regionalen Fußballspielen. Die Vereine der 1. und 2. Bundesliga rückten zunehmend in den Mittelpunkt.
- Umbau der Tribünen von Steh- in Sitzplätze, welche mehr Platz benötigen aufgrund der Vorgaben von Fußballverbänden.

- Entstehung von VIP-Bereichen, die ebenfalls mehr Platz einnehmen, aber zahlungskräftiges Publikum anlocken.

Eine Steigerung des Fassungsvermögens erfolgte nur bei besonderem Erfolg der Fußballvereine und wenn die Anzahl der Zuschauerplätze für die Fans nicht mehr ausreichte. Die Vorbereitung eines Stadions auf eine WM hatte teilweise auch eine Erhöhung der Besucherkapazität zur Folge. Allgemein kann von 1888 bis heute für deutsche Stadien eine Obergrenze von etwa 80.000 und für weltweite Fußballstadien von etwa 100.000 Zuschauerplätzen beobachtet werden.

2.3 Aktuelle Verordnungen und Normen

Aufgrund der föderalistisch organisierten Struktur der Bundesrepublik Deutschland fällt das Bauordnungsrecht in den Zuständigkeitsbereich der einzelnen Bundesländer. Die jeweiligen Landesbauordnungen (LBO) sind wesentlicher Bestandteil des öffentlichen Baurechts und orientieren sich an der Musterbauordnung (MBO), welche von der Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz (ARGEBAU) erarbeitet und veröffentlicht wird. Im Folgenden wird auf die Verordnungen und Normen eingegangen, die Einfluss auf die Dimensionierung und Auslegung von Rettungswegen in Stadien bzw. Tribünen nehmen und für das Verständnis der weiteren Arbeit hilfreich sind. Es wird gezielt auf die Musterverordnungen eingegangen, weil Stadien aus ganz Deutschland betrachtet werden und nicht die Unterschiede der einzelnen LBOs im Vordergrund stehen.

In der Musterbauordnung¹ [24] werden insbesondere Anforderungen an die Gestaltung, die Bauausführung und die Bauprodukte für Wohnhäuser gestellt. Bezogen auf die Räumung eines Gebäudes und die Dimensionierung von Rettungswegen werden nur allgemeine Anforderungen definiert:

- § 14 MBO: «Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten [...] dass bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.»
- § 34 (5) MBO: «Die nutzbare Breite der Treppenläufe und Treppenabsätze notwendiger Treppen muss für den größten zu erwartenden Verkehr ausreichen.»
- § 36 (2) MBO: «Notwendige Flure müssen so breit sein, dass sie für den größten zu erwartenden Verkehr ausreichen.»

Fußballstadien werden gemäß § 2 (4) MBO als Sonderbauten (Versammlungsstätten) definiert. Zur Orientierung für die einzelnen Bundesländer hat die ARGEBAU die «Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten²» (Muster-Versammlungsstätten-

¹Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom Oktober 2008.

²Fassung Juni 2005, zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Februar 2010.

verordnung – MVStättV [13]) veröffentlicht. Gemäß § 1 (1) MVStättV gilt diese Vorschrift für:

- «Versammlungsstätten mit Versammlungsräumen, die einzeln mehr als 200 Besucher fassen. Sie gelten auch für Versammlungsstätten mit mehreren Versammlungsräumen, die insgesamt mehr als 200 Besucher fassen, [...]»
- «Versammlungsstätten im Freien mit Szenenflächen, deren Besucherbereich mehr als 1.000 Besucher fasst [...]»
- «Sportstadien, die mehr als 5.000 Besucher fassen.»

Zur Bestimmung der Besucherzahl werden in § 1 Absatz 2 MVStättV folgende Annahmen getroffen:

- für Sitzplätze an Tischen: ein Besucher je m^2 Grundfläche des Versammlungsraumes,
- für Sitzplätze in Reihen und für Stehplätze: zwei Besucher je m^2 Grundfläche des Versammlungsraumes,
- für Stehplätze auf Stufenreihen: zwei Besucher je laufendem Meter Stufenreihe,
- bei Ausstellungsräumen: ein Besucher je m^2 Grundfläche des Versammlungsraumes.

In Abschnitt 2 der Verordnung wird detailliert auf Rettungswege eingegangen. Bezüglich der Führung von Rettungswegen wird gefordert:

- § 6 (1) MVStättV: «Rettungswege müssen ins Freie zu öffentlichen Verkehrsflächen führen. Zu den Rettungswegen von Versammlungsstätten gehören insbesondere die frei zu haltenden Gänge und Stufengänge, die Ausgänge aus Versammlungsräumen, die notwendigen Flure und notwendigen Treppen, [...]»
- § 6 (2) MVStättV: «Versammlungsstätten müssen in jedem Geschoss mit Aufenthaltsräumen mindestens zwei voneinander unabhängige bauliche Rettungswege haben; dies gilt für Tribünen entsprechend.»

Für die Bemessung von Rettungswegen sind folgende Rahmenbedingungen vorgegeben:

- § 7 (1) MVStättV: «Die Entfernung von jedem Besucherplatz bis zum nächsten Ausgang aus dem Versammlungsraum oder von der Tribüne darf nicht länger als 30 m sein. Bei mehr als 5 m lichter Höhe ist je 2,5 m zusätzlicher lichter Höhe über der zu entrauchenden Ebene für diesen Bereich eine Verlängerung der Entfernung um 5 m zulässig. Die Entfernung von 60 m bis zum nächsten Ausgang darf nicht überschritten werden.»

- § 7 (4) MVStättV: «Die Breite der Rettungswege ist nach der größtmöglichen Personenzahl zu bemessen. Die lichte Breite eines jeden Teiles von Rettungswegen muss für die darauf angewiesenen Personen mindestens betragen bei

1. Versammlungsstätten im Freien sowie Sportstadien 1,20 m je 600 Personen,
2. anderen Versammlungsstätten 1,20 m je 200 Personen.

Staffelungen sind nur in 0,60 m zulässig.»

- § 7 (6) MVStättV: «Die Entfernungen werden in der Lauflinie gemessen.»

Gemäß der Erläuterung zur MVStättV vom Juni 2005 ist eine Entleerungszeit für Versammlungsstätten im Freien von sechs Minuten und Veranstaltungsstätten in Gebäuden von zwei Minuten vorgesehen:

«Durch eine Türöffnung in der Breite des Ausgangsmoduls von 1,20 m können also jeweils zwei Personen gleichzeitig den Raum verlassen; 100 Personen benötigen dafür ca. eine Minute. Für das Verlassen eines Raumes durch ein 0,60 m Modul benötigen also ca. 50 Personen eine Minute.»

Neben der baulichen Beschaffenheit von Treppen wird bezüglich der Bemessung nur eine maximale lichte Breite vorgegeben:

- § 8 (3) MVStättV: «Die lichte Breite notwendiger Treppen darf nicht mehr als 2,40 m betragen.»

Bezüglich der Besucherplätze und Einrichtungen für Besucher ist in Abschnitt 3 der MVStättV vorgeschrieben:

- § 10 (3) MVStättV: «Sitzplätze müssen mindestens 0,50 m breit sein. Zwischen den Sitzplatzreihen muss eine lichte Durchgangsbreite von mindestens 0,40 m vorhanden sein.»
- § 10 (4) MVStättV: «Sitzplätze müssen in Blöcken von höchstens 30 Sitzplatzreihen angeordnet sein. Hinter und zwischen den Blöcken müssen Gänge mit einer Mindestbreite von 1,20 m vorhanden sein.»

In der DIN EN 13200³ [25] sind Empfehlungen für Zuschaueranlagen auf europäischer Ebene angegeben. Sofern keine nationalen Vorschriften für die Rettungswegbreite existieren, sind in der DIN EN 13200-1 Anhang E informative Werte angegeben, welche angewandt werden können. Für eine Evakuierung im Notfall sieht die Norm vor, dass Zuschauer in höchstens acht Minuten für Bereiche im Freien (nach MVStättV sechs Minuten) und innerhalb höchstens zwei

³Fassung Mai 2004.

Minuten für Bereiche in Gebäuden einen Sicherheitsplatz erreichen können. Bezüglich der Räumungszeit für Bereiche in Gebäuden und der Mindestbreite eines Ausganges von 1,20 m stimmt die Anforderung mit der nationalen Vorschrift überein.

Die deutsche Norm DIN 18065⁴ [26] beinhaltet Empfehlungen für die Auslegung von Gebäudetreppen. Neben zahlreichen Definitionen und Messregeln wird unter anderem auf das Steigungsverhältnis von Treppen für sichere und bequeme Begehbarkeit eingegangen. Das Steigungsverhältnis kann mit Hilfe der Schrittmäßregel

$$2s + a = 59 \text{ cm bis } 65 \text{ cm} \quad (2.1)$$

geplant werden. Dabei ist s die Treppensteigung und a der Treppenauftritt. Die mittlere Schrittlänge des Menschen beträgt 59 cm bis 65 cm. Als Regel für die bequeme Begehbarkeit gilt:

$$a - s = 12 \text{ cm}. \quad (2.2)$$

Als Regel für die sichere Begehbarkeit ist angegeben:

$$a + s = 46 \text{ cm}. \quad (2.3)$$

Das Steigungsverhältnis von $s/a = 17/29$ erfüllt sowohl die Schrittmäß-, die Bequemlichkeits- als auch die Sicherheitsregel.

2.4 Vergleich von Ausgangsbreiten im Tribünenbereich

Im vorherigen Kapitel 2.3 wurde auf die gesetzlichen Anforderungen bezüglich der Gestaltung und Bemessung von Rettungswegen in Stadien eingegangen. Die Breite von Rettungswegen, insbesondere das Verhältnis zwischen Personen und Rettungswegbreite, beeinflusst signifikant die Räumungszeit. Gerade für Gebäude besonderer Art und Nutzung (Sonderbauten) ist die wortgetreue Umsetzung der bauordnungsrechtlichen Anforderungen aufgrund des Gebäudekonzeptes oder aus betrieblichen Gründen oftmals schwierig. Deshalb werden individuelle Brandschutzkonzepte erstellt, in denen mit Hilfe von Ingenieurmethoden des Brandschutzes nachgewiesen wird, dass trotz der Abweichung von gesetzlichen Vorschriften das übergeordnete Schutzziel (Sicherstellung der Flucht und Rettung von Personen aus einem Gebäude) gewährleistet ist.

Meier [11] hat neun deutsche Fußball-Bundesligastadien bezüglich der Anzahl der Zuschauer pro Mundlochbreite⁵ verglichen (siehe Tabelle 2.1). Es wurde jeweils die Tribüne gegenüber der Trainerbank gewählt und der Unter- sowie Oberrang mit Hilfe von Panoramabildern aus

⁴Fassung Januar 2000.

⁵In Fußballstadien werden die Ausgänge in den Tribünen als Mundlöcher bezeichnet.

«Google Street View» vermessen. Detaillierte Informationen über die Vorgehensweise sowie Berechnung der Fehlerabschätzung siehe [11].

Mit 1,2 m Breite weist das Mundloch der Allianz Arena im ersten Oberrang den geringsten Wert und das RheinEnergieStadion mit einer Mundlochbreite von 4,8 m im Unterrang den höchsten Wert auf. Die Anzahl von Zuschauern, die einem Mundloch zugeordnet ist, variiert zwischen 458 (BayArena Oberrang) und 2.240 (Signal Iduna Park Unterrang) Personen. Bezogen auf das Verhältnis der Personen pro 0,6 m Mundlochbreite ergibt sich eine Spanne von 85 (Veltins-Arena Oberrang) bis 367 (BayArena Unterrang)⁶; das entspricht etwa einem Faktor von vier. Am häufigsten liegt dieses Verhältnis zwischen 200 und 250 Personen pro 0,6 m Modulbreite (siehe Abbildung 2.7). Die Anforderung der MVStättV von maximal 300 Personen pro 0,6 m (vgl. Kapitel 2.3) Rettungswegbreite wird in vier Fällen überschritten.

Die gemessenen Breiten beziehen sich ausschließlich auf die Mundlöcher, d. h. eine Umrechnung auf die Anzahl von Personen pro Modulbreite von 0,6 m bezieht weitere Rettungswegbreiten, wie beispielsweise zu öffnende Tore zur Entfluchtung auf das Spielfeld im Unterrang, nicht mit ein. Weil die jeweiligen Evakuierungskonzepte der Stadien nicht bekannt sind, können diese Werte für eine Beurteilung der Evakuierbarkeit der Stadien nicht herangezogen werden. Dennoch sind die gemessenen Verhältnisse aufgrund der großen Unterschiede interessant, da sie Hinweise auf die Dauer einer normalen Entleerung nach einem Fußballspiel geben, für die keine zusätzlichen Ausgänge vorgesehen sind. Es ist also eine Art «Komfortparameter».

Über die Flussgleichung kann unter Annahme eines spezifischen Flusswertes die Entleerungszeit der Tribünen abgeschätzt werden. In der Erläuterung zur MVStättV (siehe Kapitel 2.3) wird davon ausgegangen, dass 100 Personen eine 1,2 m breite Tür innerhalb von ca. 60 s passieren können; das entspricht einem spezifischen Fluss von $1,39 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$. Basierend auf diesem Flusswert beträgt die Entleerungszeit des Oberranges der Veltins-Arena 102 s und 440 s im Unterrang der BayArena. Damit erfüllt die Veltins-Arena mit schließbarem Dach rechnerisch die vorgesehene Entleerungszeit von zwei Minuten für Versammlungsstätten in Gebäuden; die BayArena mit offenem Dach überschreitet die vorgesehene Zeit von sechs Minuten um 80 s.

⁶Im Unterrang der BayArena sowie dem Oberrang der Veltins-Arena sind jeweils zwei Mundlöcher vorhanden. Da in der BayArena das obere Mundloch im Unterrang mit einem Zaun verschlossen ist, wird es in der Berechnung nicht berücksichtigt. In der Veltins-Arena werden beide Mundlöcher genutzt, folglich sind die Mundlochbreiten addiert worden [11].

Tabelle 2.1: Vergleich von neun deutschen Fußballstadien [11].

Stadion (Standort)	Dach	Rang	Sitzplatz- anzahl	Mundlochbreite in m	Rate in $\frac{\text{Pers.}}{0,6 \text{ m}}$
Allianz Arena (München)	offen	Unterrang	692	1,8	231 ± 43
		1. Oberrang	599	1,2	300 ± 125
badenova-Stadion (Freiburg)	offen	Unterrang	1.365	2,4	341 ± 36
		Oberrang	915	2,4	229 ± 24
BayArena (Leverkusen)	offen	Unterrang	1.468	2,4 (und 2,4)	367 ± 38
		Oberrang	458	2,4	115 ± 12
Fritz-Walter-Stadion (Kaiserslautern)	offen	Unterrang	1.589	2,4 und 1,8	227 ± 8
		Oberrang	1.244	1,8 und 1,8	207 ± 10
Imtech Arena (Hamburg)	offen	Unterrang	653	2,4	163 ± 17
		Oberrang	1.027	3,0	205 ± 14
RheinEnergieStadion (Köln)	offen	Unterrang	1.416	4,8	177 ± 5
		Oberrang	1.052	4,2	150 ± 5
Signal Iduna Park (Dortmund)	offen	Unterrang	2.240	2,4 und 1,8	320 ± 11
		Oberrang	1.566	3,6	261 ± 12
Veltins-Arena (Gelsenkirchen)	schließbar	Unterrang	925	3,0	185 ± 12
		Oberrang	596	2,4 und 1,8	85 ± 3
ESPRIT arena (Düsseldorf)	schließbar	Unterrang	912	2,4	228 ± 24
		Oberrang	1.040	2,4	260 ± 27

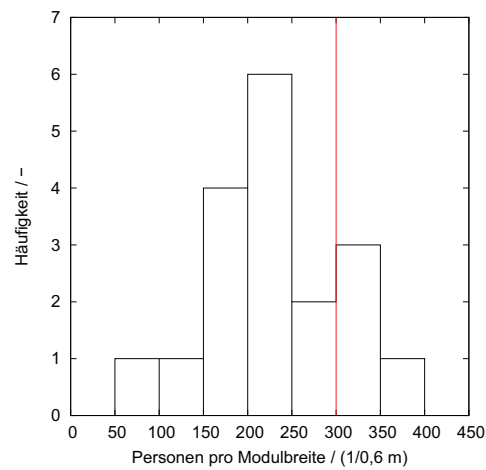


Abbildung 2.7: Häufigkeitsverteilung der Spanne von Personen pro 0,6 m Modulbreite basierend auf den Daten aus Tabelle 2.1. Die Anforderung der MVStättV von maximal 300 Personen pro 0,6 m Rettungswegbreite ist rot markiert.

Kapitel 3

Methodik

In diesem Kapitel wird auf die angewandte Methodik eingegangen und erklärt, welche Möglichkeiten Feldstudien sowie Experimente unter Laborbedingungen bieten. Darüber hinaus wird beschrieben, wie Trajektorien aus Videoaufnahmen extrahiert und welche Messmethoden zur Auswertung genutzt wurden.

3.1 Feldstudien und Experimente unter Laborbedingungen

Um Rettungswege und -konzepte optimieren zu können, ist ein Verständnis der Fußgängerbewegung essentiell. Aufgrund der zahlreichen Freiheitsgrade ist dies ein komplexes System, welches Schritt für Schritt zu analysieren ist. Feldstudien bieten die Möglichkeit, Fußgängerströme vorrangig auf makroskopischer Ebene zu untersuchen. Für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Treppen wurden in der ESPRIT arena Videoaufnahmen nach zwei Fußballspielen an drei verschiedenen Außentreppen durchgeführt. Darüber kann die unterschiedliche Nutzung der drei Treppenräume verglichen werden. Ebenfalls ist die Herleitung des Fundamentaldigramms möglich, und so kann eine Aussage über die Kapazität der Anlage im Normalbetrieb getroffen werden [27,28]. Feldstudien kamen auch zur Analyse der Kapazität von Mundlöchern bei normaler Entleerung nach Fußballspielen in der ESPRIT arena [11] und dem BORUSSIA-PARK [29] zur Anwendung. Die Personenführung in den Tribünen ist unterschiedlich. Mit Hilfe des spezifischen Flusskonzepts kann verglichen werden, welche Mundlochanordnung zu einer besseren Ausnutzung der Rettungswegbreiten führt und folglich die Entleerung beschleunigt.

Experimente unter Laborbedingungen ermöglichen die individuelle Analyse einzelner Personencharakteristika wie dichteabhängige Gehgeschwindigkeit oder statischer/dynamischer Platzbedarf auf mikroskopischer Ebene. Aufgrund der gleichen Probandengruppe können Randbedingungen gezielt verändert – beispielsweise die Positionierung eines Ordners im Mundloch – und der Einfluss auf den Personenfluss direkt quantifiziert werden. Dafür ist jedoch eine umfangrei-

che Vorbereitung der Experimente notwendig (siehe Kapitel 3.2). In der ESPRIT arena wurden auf der Außentreppe (detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 4.2) sowie der Tribüne (detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 5.3) Feldstudien und Experimente unter Laborbedingungen durchgeführt. Aufgrund der identischen Geometrie ist ein direkter Vergleich der durchgeführten Experimente möglich.

3.2 Extrahieren von Trajektorien

Während für die Videoaufnahmen in Feldstudien handelsübliche Camcorder ausreichen, kamen bei den HERMES Experimenten synchronisierte Stereokameras vom Typ Bumblebee XB3 zum Einsatz. Diese Kameras wurden gezielt ausgewählt, weil sie ein Höhenprofil erstellen können und damit später eine exakte Ortsbestimmung der Personen trotz perspektivischer Verzerrung möglich ist. Die Kameras wurden lotrecht über dem Szenario montiert, sodass alle Testpersonen über den gesamten Experimentverlauf erfasst werden konnten. Zusätzlich trugen die Probanden eine weiße Mütze, welche zentriert mit einem schwarzen Punkt markiert war, um die Personen automatisch mit der Software PeTrack [30] zu erfassen und Trajektorien zu extrahieren. Wie in Abbildung 3.1 zu sehen ist, hat die Sonneneinstrahlung auf dem ersten Teil der Treppe zu erheblichen Schwierigkeiten bei der automatischen Erfassung geführt, weil Kontraste nur schwer erkennbar sind. Hier war eine manuelle Korrektur notwendig. Zukünftig ist das Ziel, Personen auch bei hohen Dichten ohne Marker tracken zu können [31].

Die aus Videoaufnahmen extrahierten Trajektorien liefern die exakte Position der Probanden für jeden frame¹ Δt als dreidimensionalen Vektor $\vec{x}_i = (x, y, z)$. Für einen kompletten Durchlauf kann der Satz an Trajektorien wie folgt beschrieben werden:

$$\{\vec{x}_i(t_0), \vec{x}_i(t_0 + \Delta t), \vec{x}_i(t_0 + 2\Delta t), \dots, \vec{x}_i(t_0 + m\Delta t)\} \quad (3.1)$$

mit m als maximale Anzahl der frames, bei denen Testperson i erfasst wurde und $\Delta t = 1$ frame = 0,0625 Sekunden.

Für die Auswertung der Experimente wird eine horizontale Projektion des Vektors auf den Fußboden genutzt, d. h., dass die z-Koordinate, welche die Höhe der Trajektorie beschreibt, unberücksichtigt bleibt. Der maximale Fehler der Trajektorienpunkte liegt im Randbereich bei $\pm 5,2$ cm.

¹Ein Video besteht aus mehreren einzelnen Bildern (frames), die schnell nacheinander abgespielt werden. Unsere Videoaufnahmen wurden mit 16 Bildern pro Sekunde (frames per second = fps) aufgenommen.

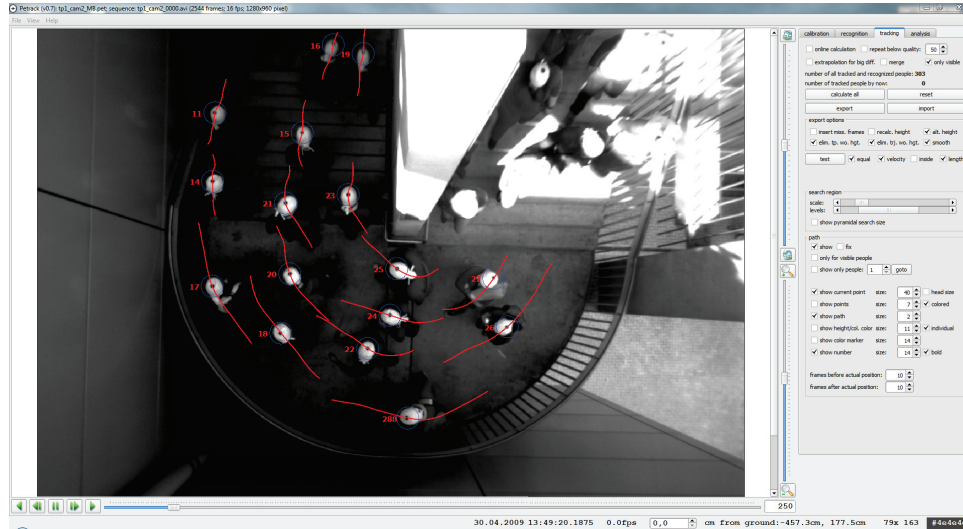


Abbildung 3.1: Benutzeroberfläche der Software PeTrack.

3.3 Messmethoden

In [32] wird beschrieben, dass verschiedene Messmethoden zu Unterschieden im Fundamentaldiagramm führen können. Zhang [4] hat vier verschiedene Messmethoden verglichen und herausgefunden, dass nur der Grad der Fluktuation beeinflusst wird, nicht der Verlauf des resultierenden Fundamentaldiagramms. Die Voronoi-Methode [33, 34] liefert, bezogen auf die räumliche und zeitliche Auflösung, die besten Ergebnisse mit geringen Fluktuationen. Auf die Genauigkeit der angewandten makroskopischen Messmethode wird in Abschnitt 3.3.3 eingegangen.

3.3.1 Makroskopische Analyse

Für die Videoaufnahmen im Rahmen der Feldstudie auf der Außentreppe montierten wir die Kamera so, dass die optische Achse des Kameraobjekts im rechten Winkel zur Treppenauflinie steht. Während der Aufzeichnung (mit 25 Bildern pro Sekunde) wurde an zwei Treppenstufen, deren horizontaler Abstand zwei Meter beträgt, jeweils in der Höhe von 1,80 m (gemessen lotrecht über dem Treppenauftritt) eine Markierung angebracht. Durch diese Markierung werden Messfehler bei der Zeiterfassung aufgrund der perspektivischen Sicht reduziert. Beide Markierungen kombiniert mit der effektiven Breite der Treppe beschreiben ein horizontales Messfeld von $A = 2,4 \text{ m} \cdot 2,0 \text{ m} = 4,8 \text{ m}^2$. Mit Hilfe eines Computerprogrammes wurden zwei Messlinien durch die Markierungen und parallel zur Vorderkante der Stufen visualisiert (siehe Abbildung 3.2). Zur Bestimmung der Personenzahl im Messfeld sind die Eintrittszeiten t_{in} und

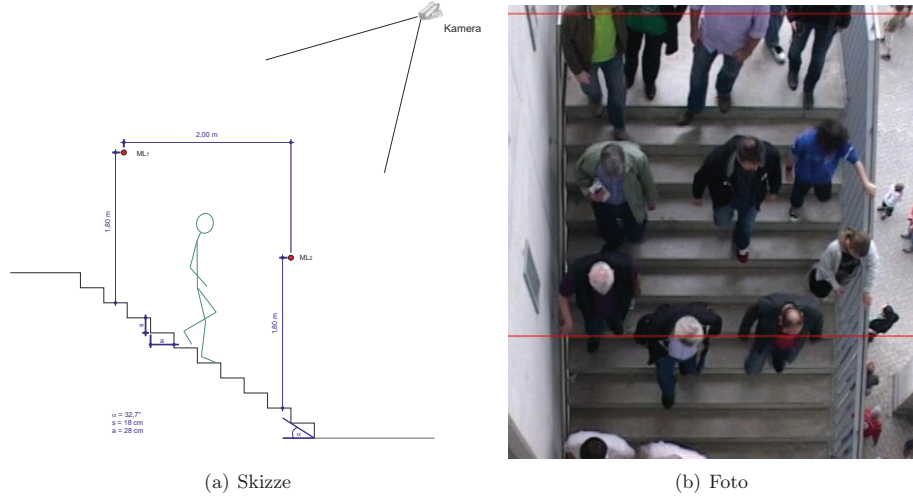


Abbildung 3.2: (a) Schematische Darstellung der makroskopischen Messmethode und (b) Foto von einer Feldstudie auf der Außentreppe. Die genutzten Messlinien sind rot dargestellt.

Austrittszeiten t_{out} aller Personen erforderlich. Bei der Analyse der Videos ist aufgefallen, dass Personen bei der Bewegung auf Treppen abwärts dazu neigen, den Kopf vorzubeugen (siehe Abbildung 3.2b). Wählt man also den Schnittpunkt von Kopf und Messlinie als Kriterium der Zeiterfassung, kann es passieren, dass die Person gezählt wird obwohl der Körperschwerpunkt noch außerhalb des Messfeldes liegt. Um diesen Effekt auszuschließen wurde die Kongruenz von gedachter Schulterachse und Messlinie als Zählkriterium gewählt. Basierend auf dieser manuellen Zeiterfassung erfolgte die automatisierte Berechnung von Dichte und Personenfluss. Für jede Person, die das Messfeld betritt, wird ein Zähler um eins erhöht; für jede Person, die das Messfeld verlässt, um eins reduziert. Die gegenwärtige Anzahl der Personen N dividiert durch die Messfläche A ergibt die klassische Dichte ($\rho = \frac{N}{A}$ in m^{-2}). Mit dieser Methode kann jedem frame eine Dichte zugewiesen werden.

Der Personenfluss wurde über den Mittelwert von $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ berechnet, wobei t_i der frame ist, in welchem eine Person die Messlinie überschreitet. Die timegaps² wurden kontinuierlich aufsummiert, bis die Summe 125 frames erstmalig überschreitet ($\approx 5 \text{ s}$ bei Videos mit 25 Bildern pro Sekunde) plus den timegap der nächsten Person:

$$J = \frac{1}{\overline{\Delta t_i}} \quad \text{mit} \quad \overline{\Delta t_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \Delta t_i. \quad (3.2)$$

Mit dieser Messmethode kann das gesamte Video ohne Verlust von Informationen analysiert werden. Eine negative Konsequenz sind große Zeitintervalle am Anfang und am Ende der Entleerungsphase. Außerhalb des stationären Zustandes können timegaps mehrere Sekunden lang

²Zeitlicher Abstand zweier hintereinander gehender Personen.

werden, weil die Treppe von einzelnen Personen genutzt wird. Es werden keine personenbezogenen Ein- bzw. Austrittszeiten erfasst. Weil Überholungen auf der Treppe nicht auszuschließen sind, ist eine direkte Berechnung individueller Geschwindigkeiten auf dieser Datenbasis nicht möglich. Die Gegenüberstellung von spezifischem Fluss J_s und der mittleren Dichte $\bar{\rho}$ für jedes Zeitintervall Δt resultiert in einem Fundamentaldiagramm der Form $J_s(\bar{\rho})$. Über die Flussgleichung kann die mittlere Gehgeschwindigkeit bestimmt werden: $\bar{v} = \frac{J}{\rho \cdot b}$ in $\frac{m}{s}$.

3.3.2 Mikroskopische Analyse

Für eine mikroskopische Analyse der Basisparameter freie Gehgeschwindigkeit, Dichte und Personenfluss mittels der Voronoi-Messmethode sind exakte Trajektorien der Personen notwendig. Bezogen auf Gleichung 3.1 kann die Geschwindigkeit \vec{v}_i für jeden frame t_j wie folgt definiert werden:

$$\vec{v}_i(t_j) = \frac{\vec{x}_i(t_j + \Delta t) - \vec{x}_i(t_j)}{\Delta t}. \quad (3.3)$$

Die Verwendung der Gleichung 3.3 kann aufgrund von Kopfschwankungen der Personen zu starken Fluktuationen führen. Deshalb wird die momentane Geschwindigkeit $\vec{v}_i(t_j)$ der Person i über ein kleines Zeitintervall $\Delta t' = 0,625$ s (das entspricht 10 frames bei 16 fps) um t_j berechnet:

$$\vec{v}_i(t_j) = \frac{|\vec{x}_i(t_j + \Delta t'/2) - \vec{x}_i(t_j - \Delta t'/2)|}{\Delta t'}. \quad (3.4)$$

Grundgedanke des Voronoi-Diagramms ist es, jedem Fußgänger die Flächenpunkte zuzuweisen, die näher zu dieser Person als zu jeder anderen liegen (siehe Abbildung 3.3). So kann zu jedem Zeitschritt die Fläche der Voronoi-Zelle A_i berechnet und die Dichte- sowie Geschwindigkeitsverteilung $\rho_{x,y}$ und $v_{x,y}$ bestimmt werden. Die Definitionen sind entnommen aus [4, 33]:

$$\rho_{x,y} = \frac{1}{A_i} \quad \text{und} \quad v_{x,y} = \vec{v}_i(t_j) \quad \text{wenn} \quad (x, y) \in A_i \quad (3.5)$$

mit $\vec{v}_i(t_j)$ als momentane Geschwindigkeit für jede Person (siehe Gleichung 3.4).

Die mittlere Voronoi-Dichte $\bar{\rho}_v$ eines Messfeldes ist definiert als:

$$\bar{\rho}_v = \frac{\iint \rho_{x,y} dx dy}{\Delta y \cdot \Delta x}. \quad (3.6)$$

Δy ist die Breite und Δx die Länge des Messfeldes. Gleichmaßen ist die mittlere Voronoi-Geschwindigkeit \bar{v}_v definiert als:

$$\bar{v}_v = \frac{\iint v_{x,y} dx dy}{\Delta y \cdot \Delta x}. \quad (3.7)$$

Im Gegensatz zu Standard-Messmethoden können mit diesem Verfahren Messfelder kleiner als die Projektionsfläche von Personen gewählt werden. Durch die Wahl eines Messfeldes von $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ kann die räumliche Abhängigkeit der Dichte, Geschwindigkeit und dem spezifi-

schem Fluss analysiert werden. Die Berechnung der Basisgrößen erfolgt frameweise. Anschließend werden über den stationären Zustand die räumlich und zeitlich aufgelösten Karten der Dichte $\bar{\rho}(x, y)$, Geschwindigkeit $\bar{v}(x, y)$ und dem spezifischen Fluss $\bar{J}_s(x, y)$ ermittelt (siehe Abbildung 4.12):

$$\bar{\rho}(x, y) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \langle \rho \rangle_v(x, y) dt}{t_2 - t_1}, \quad (3.8)$$

$$\bar{v}(x, y) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \langle v \rangle_v(x, y) dt}{t_2 - t_1}, \quad (3.9)$$

$$\bar{J}_s(x, y) = \bar{\rho}(x, y) \cdot \bar{v}(x, y). \quad (3.10)$$

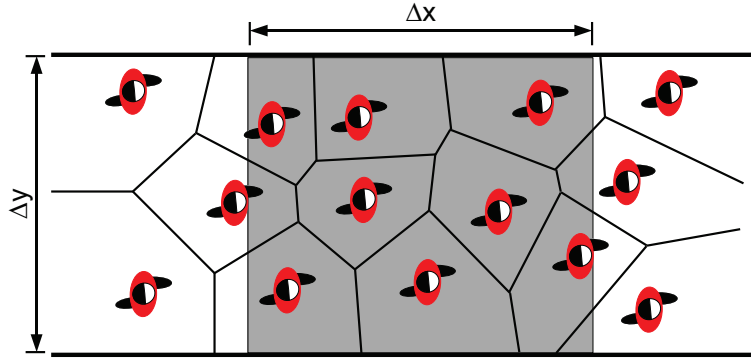


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Voronoi-Messmethode [4].

3.3.3 Vergleich der Messmethoden

Die makroskopische Messmethode ist aufgrund der manuellen visuellen Zeiterfassung fehleranfällig. Um die Qualität der Messmethode bewerten zu können, wurden die Experimente unter Laborbedingungen auf der Außentreppe der ESPRIT arena sowohl mit der makroskopischen als auch der mikroskopischen Messmethode ausgewertet und die Fundamentaldiagramme gegenübergestellt (siehe Abbildung 3.4). Bis auf einzelne Ausreißer werden keine großen Unterschiede sichtbar. Während mit der Voronoi-Messmethode Dichten bis $2,9 \text{ m}^{-2}$ gemessen werden konnten, liefert der makroskopische Ansatz eine maximale Dichte von $2,6 \text{ m}^{-2}$ (siehe Tabelle 3.1). Mit der makroskopischen Messmethode konnte bei einer Dichte von $1,9 \text{ m}^{-2}$ eine Kapazität von $1,5 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ (Einzelwert) und mit der mikroskopischen Methode von $1,3 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ermittelt werden.

Obwohl die makroskopische Messmethode simpler ist und erheblich weniger Vorbereitung benötigt, weichen die Basisgrößen nur geringfügig von der detaillierten Voronoi-Messmethode ab. Um einen ersten Überblick über die Kenngrößen des Fundamentaldiagramms für eine Anlage zu erhalten, genügt die makroskopische Messmethode. Es bleibt jedoch zu berücksichtigen, dass der makroskopische Ansatz nur Mittelwerte liefert und dadurch Einzeleffekte übersehen werden können. Eine Diskontinuität im Fundamentaldiagramm für einen Korridor konnte beispielsweise nur durch die feine Auflösung der Voronoi-Messmethode festgestellt werden [4].

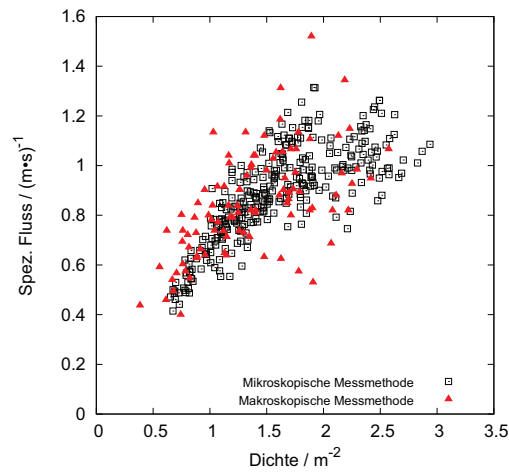


Abbildung 3.4: Vergleich der makroskopischen und mikroskopischen Messmethode.

Tabelle 3.1: Vergleich der elementaren Größen auf makro- und mikroskopischer Ebene.

Größe	Makro. Methode	Mikro. Methode
ρ_{max} in m^{-2}	2,6	2,9
$\rho(J_{s,max})$ in m^{-2}	1,9	1,9
$J_{s,max}$ in $(m \cdot s)^{-1}$	1,5	1,3

Kapitel 4

Leistungsfähigkeit von Treppen

In diesem Kapitel wird auf die Quantifizierung des Fußgängerverkehrs auf Treppen sowie verschiedener Einflussfaktoren eingegangen. Es folgt eine Literaturrecherche, die neue Fragen aufwirft. Für deren Beantwortung wurden Feldstudien sowie Experimente unter Laborbedingungen durchgeführt. Diese werden detailliert beschrieben und analysiert.

4.1 Stand des Wissens

Die Auswertung der Daten zum Fundamentaldiagramm für Treppen wurde erheblich durch einen Faktor erschwert: es fehlt eine einheitliche Darstellungsform des Fundamentaldiagramms. Zwar sind sich alle in der nachfolgenden Literaturrecherche erwähnten Autoren einig, dass ein Anstieg der Personen auf einer definierten Fläche (zumindest ab einem bestimmten Wert) die Gehgeschwindigkeit reduziert, jedoch ist die Darstellungsform teilweise unterschiedlich. Einige Autoren beschreiben die Gehgeschwindigkeit auf Treppen entlang der tatsächlichen Weglänge, andere wählen die horizontale Komponente, weil diese einen direkten Vergleich mit der Geschwindigkeit auf horizontalem Terrain bietet, oder es wird diesbezüglich gar keine Aussage getroffen. Für die Beschreibung der Personenzahl pro Fläche wird neben der klassischen Dichte die «interperson distance» [35] oder das «Pedestrian Area Modul» [8] verwendet. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass mit einer Stoppuhr gemessene Werte aus den 1950er Jahren des letzten Jahrhunderts mit computergestützten Messergebnissen aus dem 21. Jahrhundert verglichen werden. Auch kulturelle Unterschiede können Einfluss auf das Fundamentaldiagramm nehmen [36].

4.1.1 Planungshandbücher

Grundlage für die als Ingenieurmethoden anerkannten Handrechenverfahren bilden die folgenden vier Planungshandbücher [5–8], die in den letzten fünfzig Jahren veröffentlicht wurden.

4.1.1.1 Predtetschenski und Milinski: «Personenströme in Gebäuden»

Das Handbuch «Personenströme in Gebäuden» [5] von Predtetschenski und Milinski (PM) aus dem Jahr 1971, das auf Untersuchungen in der damaligen UdSSR während der sechziger und siebziger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts beruht, bildet auch heute noch die Grundlage für makroskopische Handrechenverfahren zur Evakuierungsberechnung. Dieses etablierte Werk ermöglicht es, Räumungszeiten für Gebäude jeglicher Art abzuschätzen.

PM gehen von einem hydraulischen Modell aus, in welchem die Personen ähnlich wie Flüssigkeiten behandelt werden. Es bilden sich Personenströme aus, die mit der Form einer langgestreckten Form einer Zigarre der Länge l_{Strom} und Breite b verglichen werden können. Eigenschaften der Individuen bleiben im Gesamtsystem unberücksichtigt. Diese Personenströme werden durch ihre Dichte ρ und die davon abhängige Geschwindigkeit v definiert, worüber unter Berücksichtigung der Breite einer Anlage ein Personenfluss J bestimmt werden kann. Es sind vier Anwendungsfälle zu unterscheiden: *horizontale Wege*, *Wegeinengungen und Durchgänge*, *Treppe aufwärts* und *Treppe abwärts*. Je nach Situation kann eine bestimmte Bewegungsbedingung mit berücksichtigt werden: *Gefahrenbedingung*, *Normalbedingung* und *komfortable Bedingung*.

Für die Beschreibung von Personenströmen verwenden PM eigene Notationen. Die Dichte D hängt von den unterschiedlich beanspruchten Flächen f (siehe Tabelle 4.1) ab und ist wie folgt definiert:

$$D = \frac{\sum f}{b \cdot l_{Strom}} \text{ in } \frac{m^2}{m^2} \quad (4.1)$$

mit $\sum f$ in m^2 = Summe der einzelnen beanspruchten Flächen der Personen.

Aus dem Produkt von Dichte und Geschwindigkeit resultiert der spezifische Personenfluss, der als Bewegungsintensität q bezeichnet wird:

$$q = D \cdot v \text{ in } \frac{m}{min} \quad (4.2)$$

Die Durchlassfähigkeit Q entspricht dem klassischen Personenfluss J :

$$Q = D \cdot v \cdot b = q \cdot b \text{ in } \frac{m^2}{min} \quad (4.3)$$

Tabelle 4.1: Zusammenstellung der unterschiedlich beanspruchten Flächen f [5].

Alter, Bekleidung und Gepäck der Person	Fläche f in m^2
Kind	0,04 ... 0,06
Jugendlicher	0,06 ... 0,09
Erwachsener:	
in Sommerkleidung bzw. Hausbekleidung	0,100
in Übergangsstraßenkleidung	0,113
in Winterstraßenkleidung	0,125
Erwachsener in Übergangsstraßenkleidung:	
mit leichtem Gepäck (z. B. Aktentasche)	0,180
mit einem Koffer	0,240
mit Rucksack	0,260
mit schwerem Gepäck (z. B. zwei Koffer)	0,390
mit einem Kind an der Hand	0,200
mit einem Kind auf dem Arm	0,260
mit einem Kind an der Hand (einschl. Gepäck)	0,320

Wie bereits beschrieben ist die Geschwindigkeit v von der Dichte D abhängig. Um die Geschwindigkeit für Treppen ermitteln zu können, muss zunächst die Geschwindigkeit für horizontale Wege berechnet werden:

$$v = 112 \cdot D^4 - 380 \cdot D^3 + 434 \cdot D^2 - 217 \cdot D + 57 \text{ in } \frac{m}{min} \quad (4.4)$$

Die Geschwindigkeit von Personenströmen auf Treppen abwärts ergibt sich aus der horizontalen Geschwindigkeit multipliziert mit einem empirisch ermittelten Koeffizienten. Da bei geneigten Wegen (Treppe oder Rampe) die tatsächliche Lauflänge betrachtet wird, ist davon auszugehen, dass sich die Geschwindigkeit ebenfalls auf die Lauflinie bezieht und wird in der weiteren Betrachtung auch so behandelt:

$$v_{ab} = v \cdot m_{ab} \quad (4.5)$$

mit $m_{ab} = 0,775 + 0,44 \cdot e^{-0,39 \cdot D} \cdot \sin(5,61 \cdot D + 0,224)$.

Folglich gilt für Bewegungen auf Treppen aufwärts:

$$v_{auf} = v \cdot m_{auf} \quad (4.6)$$

mit $m_{auf} = 0,785 + 0,09 \cdot e^{-3,45 \cdot D} \cdot \sin(15,7 \cdot D)$ für $D = 0,00$ bis $0,60 \frac{m^2}{m^2}$
und $m_{auf} = 0,785 - 0,10 \cdot \sin(7,85 \cdot D + 1,57)$ für $D = 0,61$ bis $0,92 \frac{m^2}{m^2}$.

Gemäß Formel 4.2 kann die Intensität der Bewegung auf Treppen beschrieben werden:

$$q_{ab} = D \cdot v_{ab} \quad (4.7)$$

$$q_{auf} = D \cdot v_{auf} \quad (4.8)$$

Abbildung 4.1 zeigt die Fundamentaldiagramme für Treppen nach Predtetschenski und Milinski. Die Funktion für Treppen aufwärts lässt deutlich erkennen, dass ab einer Dichte von $0,61 \frac{m^2}{m^2}$ ein anderer Koeffizient in die Berechnung eingeht.

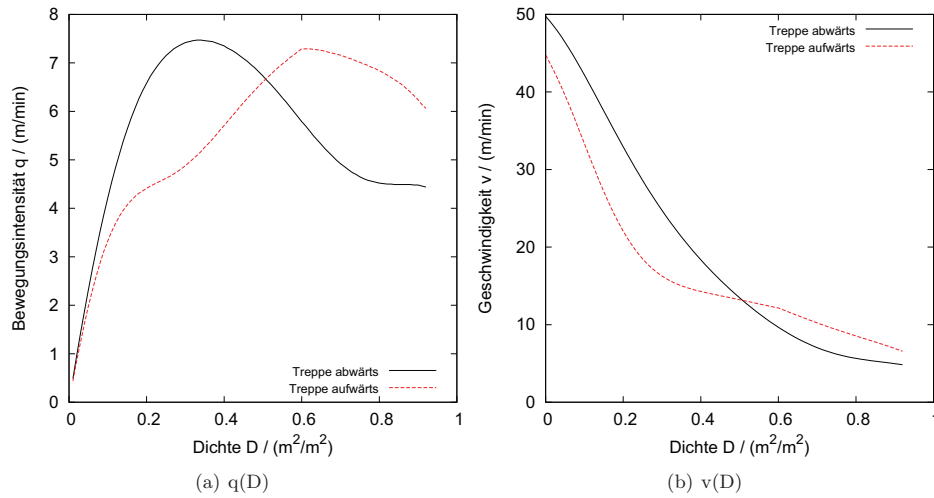


Abbildung 4.1: Fundamentaldiagramme für Treppen nach Predtetschenski und Milinski [5].

4.1.1.2 Weidmann: «Transporttechnik der Fußgänger»

«Transporttechnik der Fußgänger» [6] ist eine Veröffentlichung von Weidmann (WM) aus dem Jahr 1993 und gibt einen guten Überblick über den Stand des Wissens auf dem Gebiet der transporttechnischen Eigenschaften des Fußgängerverkehrs. Es wurden keine eigenen Experimente durchgeführt, sondern zahlreiche Literaturquellen ausgewertet. Insgesamt umfasste die Literaturstudie ca. 200 Veröffentlichungen zum Fußgängerverkehr in Fachzeitschriften und Büchern der letzten Jahrzehnte mit Schwerpunkt im deutschen und angelsächsischen Sprachraum. Darauf aufbauend wurden Fundamentaldiagramme für verschiedene Anlagentypen erarbeitet. Für die Bewegung auf Treppen ist jedoch auch hier die Datenbasis gering.

Ähnlich wie PM betrachtet Weidmann Fußgängerströme in Analogie zur Hydraulik. Die Anzahl von Fußgängern F mit der Dichte D' , die eine nutzbare Fußwegbreite B_N in der Beobachtungszeit t passiert, kann wie folgt berechnet werden:

$$F = D' \cdot B_N \cdot v_{F,h} \cdot t \quad (4.9)$$

Bestimmt wird die Fußwegbreite B_N aus der Bruttobreite B_B abzüglich des Verlustes B_H aufgrund von Hindernissen und Wandeinflüssen:

$$B_N = B_B - B_H \text{ in } m \quad (4.10)$$

Der Personenfluss, von Weidmann als Leistungsfähigkeit L einer Fußgängeranlage beschrieben, errechnet sich aus dem Quotienten von F und t :

$$L = \frac{F}{t} = D' \cdot B_N \cdot v_{F,h} \text{ in } \frac{1}{s} \quad (4.11)$$

Folglich gilt für die spezifische Leistungsfähigkeit L_s :

$$L_s = \frac{L}{B_N} = D' \cdot v_{F,h} \text{ in } \frac{1}{m \cdot s} \quad (4.12)$$

Die horizontale Fußgängergeschwindigkeit $v_{F,h}$ auf Treppen (auf- bzw. abwärts) ist abhängig von der Personendichte D' :

$$v_{F,h,auf} = 0,610 \cdot [1 - e^{-3,722 \cdot (\frac{1}{D'} - \frac{1}{5,4})}] \text{ in } \frac{m}{s} \quad (4.13)$$

$$v_{F,h,ab} = 0,694 \cdot [1 - e^{-3,802 \cdot (\frac{1}{D'} - \frac{1}{5,4})}] \text{ in } \frac{m}{s} \quad (4.14)$$

Für die spezifische Leistungsfähigkeit eines Querschnittes definiert Weidmann folgende Dichteabhängigkeit:

$$L_{s,auf} = 0,610 \cdot D' \cdot [1 - e^{-3,722 \cdot (\frac{1}{D'} - \frac{1}{5,4})}] \text{ in } \frac{1}{m \cdot s} \quad (4.15)$$

$$L_{s,ab} = 0,694 \cdot D' \cdot [1 - e^{-3,802 \cdot (\frac{1}{D'} - \frac{1}{5,4})}] \text{ in } \frac{1}{m \cdot s} \quad (4.16)$$

Die resultierenden Fundamentaldiagramme für Treppen sind in Abbildung 4.2 dargestellt. *Parameters of pedestrians, pedestrian traffic and walking facilities* [37] aus dem Jahr 2007 ist eine aktualisierte Fassung des Handbuches von Weidmann. Für das Fundamentaldiagramm werden jedoch keine neuen Erkenntnisse präsentiert.

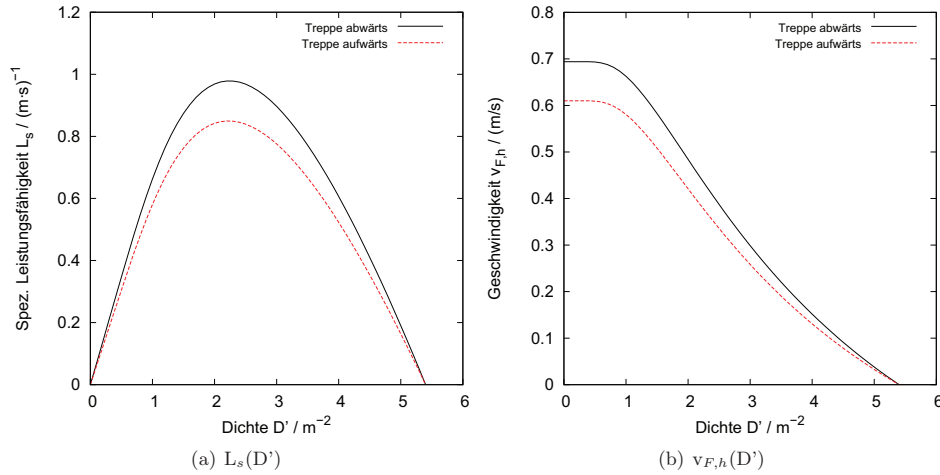


Abbildung 4.2: Fundamentaldiagramme für Treppen nach Weidmann [6].

4.1.1.3 Nelson und Mowrer: «Emergency Movement»

Das Buch «The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering» [38] kann als Standardwerk der Ingenieurmethoden des Brandschutzes und der Sicherheitstechnik bezeichnet werden. Nelson und Mowrer (NM) gehen im Kapitel «Emergency Movement» [7] auf die Grundlagen der Fußgängerdynamik ein. Die von ihnen erfassten Zusammenhänge basieren ebenfalls auf einem hydraulischen Modell. Wie auch in anderen Handbüchern werden eigene Bezeichnungen für die Basisgrößen verwendet.

Der spezifische Personenfluss F_s kann über das Produkt von Gehgeschwindigkeit S und Personendichte D' berechnet werden:

$$F_s = S \cdot D' \text{ in } \frac{1}{m \cdot s} \quad (4.17)$$

Für die Berechnung der Geschwindigkeit S ist die Dichte D' notwendig. Auf Treppen wird die Geschwindigkeit der tatsächlichen Lauflänge angegeben. Die Art der Wegstrecke geht über den Faktor k in die Berechnung ein, a ist ein Umrechnungsfaktor für das angloamerikanische bzw. metrische Längensystem¹ (siehe Tabelle 4.2):

$$S = k - a \cdot k \cdot D' \text{ in } \frac{m}{s} \quad (4.18)$$

Diese Abhängigkeit gilt nach NM für $0,54 \leq D' < 3,80 m^{-2}$. Für Dichten kleiner als $0,54 m^{-2}$ ist eine freie Wahl der Gehgeschwindigkeit für Fußgänger möglich.

¹Metrisches Längensystem: $k = k_2$; $a = 0,266$. Angloamerikanisches Längensystem: $k = k_1$; $a = 2,86$.

Tabelle 4.2: Faktoren für die Berechnung der Geschwindigkeit nach Nelson und Mowrer. Die Tabelle ist entnommen und übersetzt aus [7].

Ausgang Route Element	k_1	k_2
Korridor, Gang, Rampe, Türöffnung	275	1,40
Treppen		
Steigung(in.)	Auftritt(in.)	
7,5	10	196 1,00
7,0	11	212 1,08
6,5	12	229 1,16
6,5	13	242 1,23

Folglich kann der spezifische Fluss zusammengefasst werden:

$$F_s = (1 - a \cdot D') \cdot k \cdot D' \text{ in } \frac{1}{m \cdot s} \quad (4.19)$$

Der Personenfluss, in diesem Handbuch als kalkulierter Fluss F_c beschrieben, ergibt sich aus der Multiplikation von spezifischem Fluss F_s und nutzbarer Breite W_e :

$$F_c = F_s \cdot W_e \text{ in } \frac{1}{s} \quad (4.20)$$

Die nutzbare Breite W_e wird aus der Gesamtbreite W abzüglich der nicht genutzten Breite W_{unused} nahe der Wand berechnet (siehe Tabelle 4.3):

$$W_e = W - W_{unused} \text{ in } m \quad (4.21)$$

Tabelle 4.3: Größen der ungenutzten Wegbreiten nach Nelson und Mowrer. Die Tabelle ist entnommen und übersetzt aus [7].

Ausgang Route Element	Grenzfläche	
	(in.)	(cm)
Treppen - Wand oder äußere Seite der Stufe	6	15
Geländer, Handlauf	3,5	9
Theaterstühle, Stadionsitze	0	0
Korridor, Rampe Wände	8	20
Hindernisse	4	10
Hallen, Durchgänge	< 18	46
Tür, Torbogen	6	15

Abbildung 4.3 zeigt die Fundamentaldiagramme für Treppen nach Nelson und Mowrer für verschiedene Treppenneigungen.

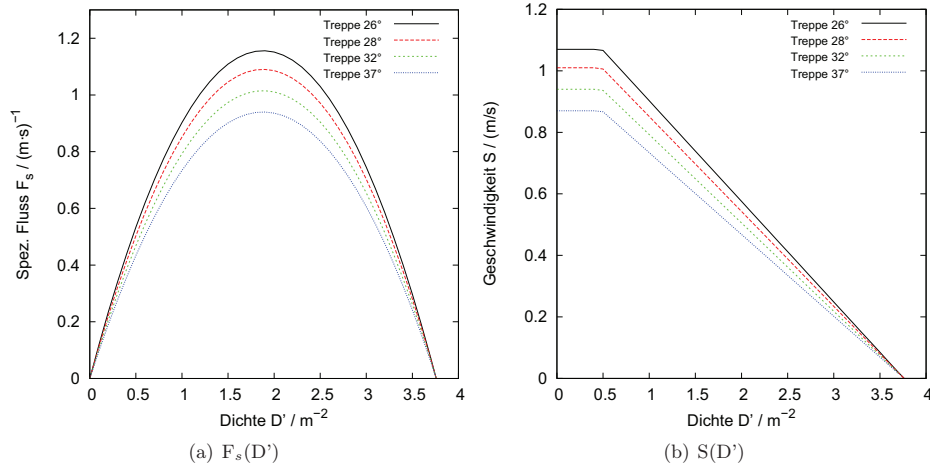


Abbildung 4.3: Fundamentaldiagramme für Treppen nach Nelson und Mowrer [7].

4.1.1.4 Fruin: «Pedestrian Planning and Design»

«Pedestrian Planning and Design» [8] von Fruin (FN) aus dem Jahr 1971 ist ein umfassendes Werk, das viele verschiedene Aspekte des Fußgängerverkehrs beleuchtet. Ein großer Teil des Inhaltes basiert auf der Dissertation «Designing for Pedestrians» des Autors. Für die Quantifizierung des Fußgängerverkehrs wurden wenige Formeln hergeleitet, stattdessen stehen Aspekte wie das Sichtfeld oder der statische und dynamische Platzbedarf einer Person im Vordergrund.

Den spezifischen Fluss P beschreibt Fruin, ebenfalls basierend auf dem hydraulischen Modell, als Produkt aus durchschnittlicher Geschwindigkeit S und mittlerer Dichte D'' :

$$P = S \cdot D'' \text{ in } \frac{1}{\text{ft} \cdot \text{min}} \quad (4.22)$$

Fruin findet die Verwendung der klassischen Dichte problematisch und führt deshalb das *Pedestrian Area Modul* M ein, das dem reziproken Wert der Dichte D'' entspricht. Daraus resultiert folgende Gleichung für den spezifischen Fluss:

$$P = \frac{S}{M} \text{ in } \frac{1}{\text{ft} \cdot \text{min}} \quad (4.23)$$

In Abbildung 4.4 sind die Fundamentaldiagramme mit Messwerten dargestellt. Wie Fruin von den angegebenen Messpunkten auf die Funktion schließt, wird nicht erläutert. Templer [39] hat basierend auf diesen Datensätzen folgende Gleichungen hergeleitet:

$$Flow_{up} = \frac{111 \cdot Space - 162}{Space^2} \text{ in } \frac{1}{\text{min} \cdot \text{ft}} \quad (4.24)$$

$$Speed_{up} = \frac{111 \cdot Space - 162}{Space} \text{ in } \frac{ft}{min} \quad (4.25)$$

$$Flow_{down} = \frac{128 \cdot Space - 206}{Space^2} \text{ in } \frac{1}{min \cdot ft} \quad (4.26)$$

$$Speed_{down} = \frac{128 \cdot Space - 206}{Space} \text{ in } \frac{ft}{min} \quad (4.27)$$

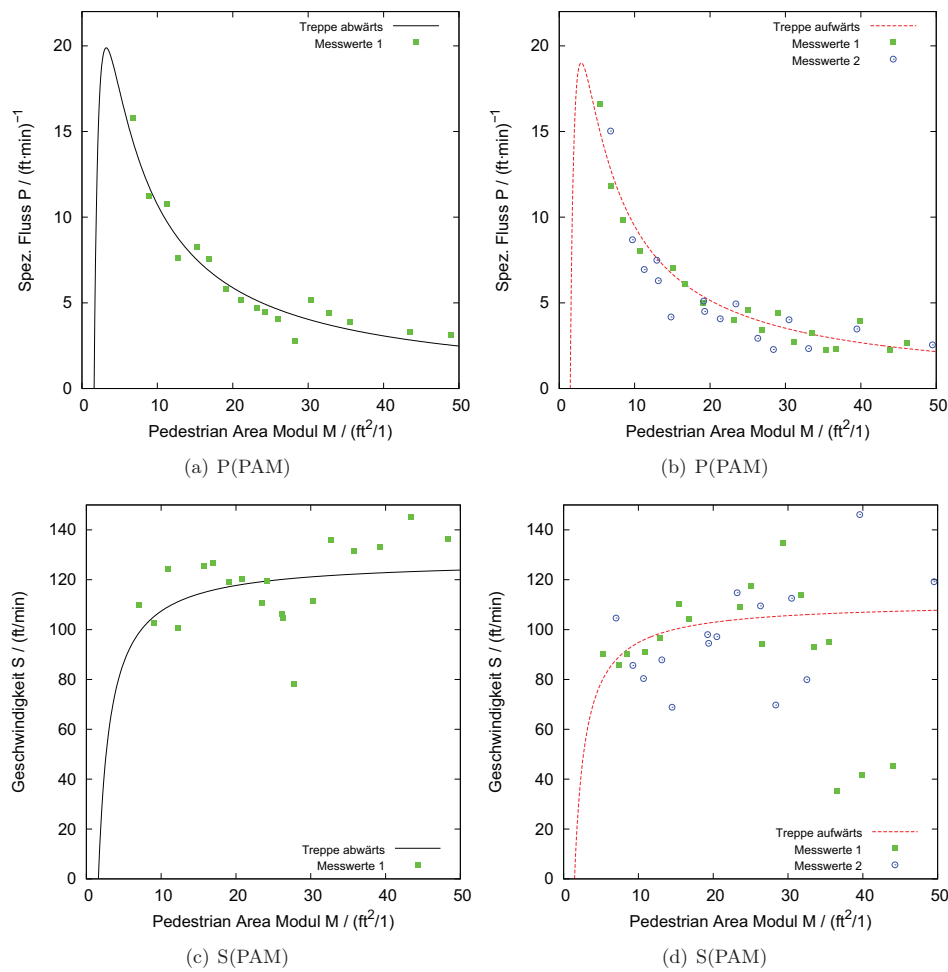


Abbildung 4.4: Fundamentaldiagramme für Treppen nach Fruin [8]. Die Messpunkte wurden aus den Diagrammen des Handbuchs entnommen und die Funktionen nach den Formeln von Templer [39] berechnet.

4.1.1.5 Vergleich der Fundamentaldiagramme

In diesem Kapitel werden die Fundamentaldiagramme der bereits vorgestellten Handbücher² verglichen (siehe Abbildung 4.5). Um eine bessere Vergleichbarkeit zu erzielen, werden alle relevanten physikalischen Größen, die im angloamerikanischen Längensystem angegeben wurden, auf das metrische Längensystem umgerechnet. Die Umrechnungsfaktoren sind in Tabelle 4.4 angegeben.

PM, WM und FN unterscheiden bei der Bewegung auf Treppen zwischen der Richtung auf- und abwärts, während NM die Neigung der Treppe als entscheidendes Kriterium verwenden. In dieser Gegenüberstellung wurde für NM das Fundamentaldiagramm für eine Treppe mit einer gängigen Neigung von $\approx 32^\circ$ gewählt und für PM wird ein Erwachsener in Sommer- bzw. Hausbekleidung ($f = 0,1 \text{ m}^2$, vergleiche Tabelle 4.1) angenommen.

Bezogen auf die Abwärtsbewegung (siehe Abbildung 4.5a) liegen die Funktionen $J_s(\rho)$ bis zu einer Dichte von $1,5 \text{ m}^{-2}$ nah zusammen. Für die freie Gehgeschwindigkeit wird eine Spanne von 0,63 bis $0,8 \text{ m/s}$ angegeben. Die Kapazität reicht von 0,98 bis $1,25 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$. WM und NM beschreiben den maximalen spezifischen Fluss bei einer Dichte von ca. 2 m^{-2} , während PM und FN die Kapazität bei einer höheren Dichte von $3,4 \text{ m}^{-2}$ angeben. An dieser Stelle ist das Maximum der Funktion von WM/NM bereits überschritten und der spezifische Fluss nimmt ab. Die maximal mögliche Dichte variiert von 3,8 bis $9,2 \text{ m}^{-2}$. Im Gegensatz zu den anderen Autoren geben PM keine Dichte an, bei der der Personenfluss zum Stillstand kommt.

Für die Aufwärtsbewegung auf Treppen (siehe Abbildung 4.5b) sind die Unsicherheiten bezüglich der Kapazität und der freien Gehgeschwindigkeit größer. Die Kapazität schwankt zwischen 0,85 und $1,22 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ und die freie Gehgeschwindigkeit zwischen 0,55 und $0,8 \text{ m/s}$. Verglichen mit der Abwärtsbewegung beschreiben WM und NM den maximal spezifischen Fluss bei der gleichen Dichte von etwa 2 m^{-2} , wohingegen PM und FN Werte von 6,1 und $3,7 \text{ m}^{-2}$ angeben. Die Spanne der maximal möglichen Dichte ist identisch mit der Abwärtsbewegung. Kenngrößen für beide Bewegungsrichtungen sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Weil die Autoren (Fruin ausgenommen) keine Messwerte präsentieren, ergeben sich drei grundlegende Fragen:

1. Sind die angegebenen Kapazitätswerte realistisch?
2. Bei welcher Personenzahl pro Quadratmeter entsteht der maximale spezifische Fluss?
3. Ab welcher Dichte kommt der Personenfluss zum Erliegen?

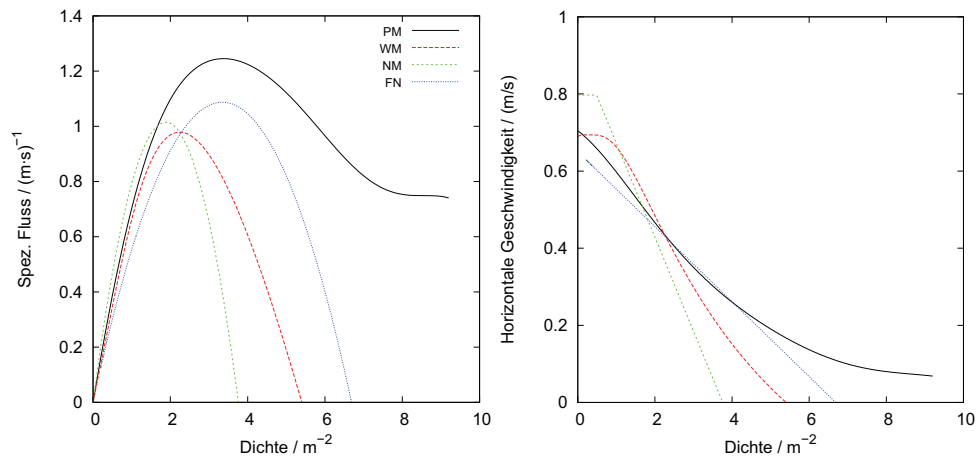
²Hier sei noch einmal angemerkt, dass es sich bei den Handbüchern von PM, WM und FN um allgemeine Planungshandbücher des Fußgängerverkehrs handelt. Das Kapitel *Emergency Movement* von NM ist Teil des SFPE.

Tabelle 4.4: Vergleich der Notationen in den Handbüchern mit Umrechnungsfaktoren.

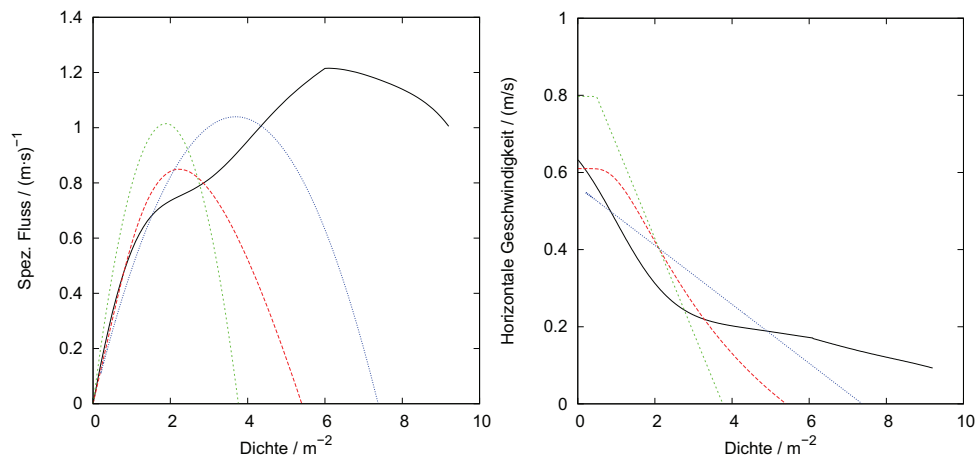
Autoren	spez. Fluss J_s in $(\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	Dichte ρ in m^{-2}	horiz. Geschw. $v_{0,hor}$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
PM	$\frac{1}{60 \cdot 0,1 \text{ m}^2} \cdot q$ in $\frac{\text{m}}{\text{min}}$	$\frac{1}{0,1 \text{ m}^2} \cdot D$ in $\frac{\text{m}^2}{\text{m}^2}$	$0,85 \cdot \frac{1}{60} \cdot v_0$ in $\frac{\text{m}}{\text{min}}$
WM	L_s in $(\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	D' in m^{-2}	$v_{F,h}$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
NM	F_s in $(\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	D' in m^{-2}	$0,85 \cdot S$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
FN	$\frac{1}{0,3048} \cdot \frac{1}{60} \cdot P$ in $\frac{\text{ft}}{\text{min}}$	$\frac{1}{x \cdot 0,0929} \cdot M$ in ft^2	$0,3048 \cdot \frac{1}{60} \cdot S$ in $\frac{\text{ft}}{\text{min}}$

Tabelle 4.5: Überblick der in den Handbüchern veröffentlichten Kenngrößen des Fundamental-diagramms für Treppen. Die Bewegungsrichtung ist mit dem Index *ab* für abwärts und *auf* für aufwärts markiert.

Handbook	$v_{0,hor}$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	ρ_{max} in m^{-2}	$\rho(J_{s,max})$ in m^{-2}	$J_{s,max}$ in $(\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$
PM	0,63 _{auf}	9,2 _{auf}	6,1 _{auf}	1,22 _{auf}
	0,70 _{ab}	9,2 _{ab}	3,4 _{ab}	1,25 _{ab}
WM	0,61 _{auf}	5,4 _{auf}	2,2 _{auf}	0,85 _{auf}
	0,69 _{ab}	5,4 _{ab}	2,2 _{ab}	0,98 _{ab}
NM	0,8 _{auf}	3,8 _{auf}	1,9 _{auf}	1,01 _{auf}
	0,8 _{ab}	3,8 _{ab}	1,9 _{ab}	1,01 _{ab}
FN	0,55 _{auf}	7,4 _{auf}	3,7 _{auf}	1,04 _{auf}
	0,63 _{ab}	6,7 _{ab}	3,4 _{ab}	1,09 _{ab}



(a) abwärts



(b) aufwärts

Abbildung 4.5: Vergleich der Fundamentaldiagramme aus Planungshandbüchern. Die Legende gilt für alle vier Diagramme.

4.1.2 Experimentelle Daten

Kapitel 4.1.1 beschreibt unterschiedliche Verläufe des Fundamentaldiagramms für Treppen. Da die Autoren (Fruin ausgenommen) diese nicht mit experimentellen Daten belegen, wird nachfolgend eine umfangreiche Literaturrecherche bezüglich experimenteller Daten präsentiert. Es wird geprüft, inwieweit die vorgestellten Spezifikationen durch Messungen aus Feldstudien oder Experimenten gestützt werden.

In den folgenden Veröffentlichungen [16, 28, 35, 39–50] werden Informationen über das Fundamentaldiagramm für Treppen gegeben, allerdings sind nur jene berücksichtigt, die reale Messwerte angeben (siehe Abbildung 4.6). Einige Autoren beschreiben mit dem Fundamentaldiagramm die funktionale Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Personendichte, in diesem Fall wurde die Flussgleichung genutzt, um den spezifischen Personenfluss zu ermitteln; $J_s = v_{hor} \cdot \rho$ entsprechend. Es wird jeweils die horizontale Komponente der Geschwindigkeit verwendet, weil diese unabhängig von der Neigung der Treppe ist.

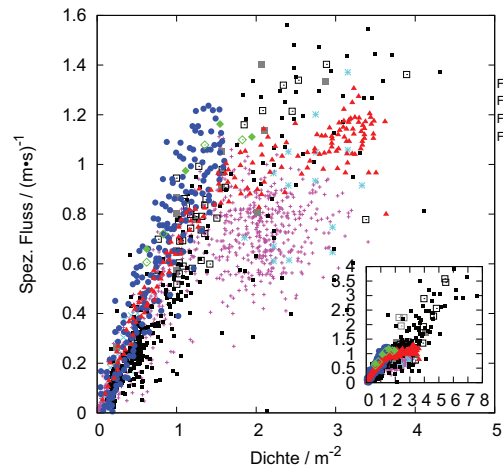
Andere Autoren konzentrieren sich neben den Transporteigenschaften von Treppen auf organisatorische Maßnahmen zur Optimierung des Räumungsprozesses von hohen Gebäuden. Sicherheitstechnische Aspekte und eine Kombination von Treppen mit Fahrtreppen werden ebenfalls thematisiert. Diese Gesichtspunkte werden in der Dissertation nicht berücksichtigt; es wird auf [51–56] verwiesen.

Für die Abwärtsbewegung auf Treppen (siehe Abbildung 4.6a) zeigen alle Messpunkte bei niedriger Personendichte eine gute Übereinstimmung. Bis zu einer Dichte von etwa $1,2 \text{ m}^{-2}$ ist ein linearer Anstieg des spezifischen Flusses, mit geringen Abweichungen der Steigung, sichtbar. Der Steigungswinkel entspricht der freien Gehgeschwindigkeit $v_{0,ab}$ und variiert zwischen 0,6 und 0,85 m/s. Die meisten Messpunkte beschreiben ein Fundamentaldiagramm bis zu einer maximalen Dichte von $3,5 \text{ m}^{-2}$ mit maximalen spezifischen Personenflüssen von $1,2 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$. In zwei Veröffentlichungen von Frantzych [35, 41], für Dichten größer 2 m^{-2} , werden Maximalwerte für den spezifischen Fluss angegeben, die dem dreifachen Wert der Messwerte anderer Autoren [16, 28, 40, 44, 47] entsprechen. Frantzych [35] beschreibt in seiner Veröffentlichung, dass Geschwindigkeiten größer 1,5 m/s wahrscheinlich Messfehler seien. Über die gesamte Spanne der Messwerte ist kein deutlicher Abfall des Personenflusses aufgrund einer Überfüllung der Treppe ersichtlich.

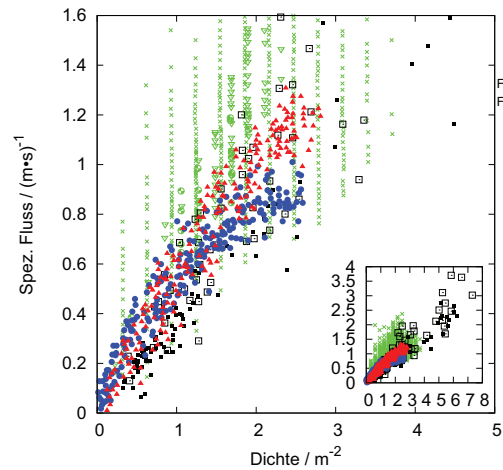
Die Betrachtung der Datensätze für die Aufwärtsbewegung zeigt, dass Seer eine andere Messmethode verwendet als die Autoren aus [35, 40, 47]. Seers Messpunkte zeigen eine vordefinierte Gitterstruktur und weisen große Schwankungen auf. Chen, Ye und Frantzych präsentieren einen ähnlichen Verlauf des Fundamentaldiagramms bis zu einer Dichte von ca. $2,7 \text{ m}^{-2}$ mit leicht unterschiedlichen spezifischen Flusswerten. Die Messwerte der drei Autoren weisen einen linearen Anstieg des Personenflusses im niedrigen Dichtebereich auf. Die freie Gehgeschwindigkeit $v_{0,auf}$ beträgt etwa 0,6 m/s. Maximale Dichten von $2,8 \text{ m}^{-2}$ wurden gemessen und eine Reduzierung

des spezifischen Flusses, aufgrund sich gegenseitig blockierender Personen bei hohen Dichten, ist nicht sichtbar.

Basierend auf diesen experimentellen Daten ist es schwierig, eindeutige Aussagen bezüglich des Fundamentaldiagramms zu treffen. Oftmals fehlen Informationen über Randbedingungen, und angewandte Messmethoden werden von den Autoren nicht beschrieben. Bezogen auf die Basiskenngrößen können jedoch Bereiche festgelegt werden (siehe Tabelle 4.6).



(a) abwärts



(b) aufwärts

Abbildung 4.6: Experimentelle Messpunkte des Fundamentaldiagramms für Treppen. Das eingeschlossene kleine Diagramm zeigt die gesamte Spannweite der Datensätze. Für weitere Informationen siehe Tabelle 4.7.

Tabelle 4.6: Anhand der experimentellen Daten abgeschätzte Bereiche für die Basiskenngrößen.

Kenngröße	Abwärts	Aufwärts
v_0 in $\frac{m}{s}$	[0,6:0,9]	$\approx 0,6$
$J_{s,max}$ in $(m \cdot s)^{-1}$	[1,1:1,4]	[1,0:1,3]
$\rho(J_{s,max})$ in m^{-2}	[1,0:3,2]	[2,4:2,5]
ρ_{max} in m^{-2}	[1,7:3,5]	[2,6:2,8]

Tabelle 4.7: Informationen zu den Messwerten in Abbildung 4.6. Für einige Datensätze wurde die Flussgleichung $J_s = \rho \cdot v_{hor}$ angewendet, um das Fundamentaldiagramm in die Form $J_s(\rho)$ umzuwandeln. Feldstudie ist mit F und Experiment mit E abgekürzt.

Autor	Jahr	Typ	Richtung / Neigung	Zusätzliche Informationen	Flussgleichung angewendet?
Burghardt [28]	2010	F	\searrow / $32,7^\circ$	Fußballstadion	Nein
Hoskin-1 [44]	2004	F	\searrow / -	Neigung nicht angegeben	Ja
Hoskin-2	2004	F	\searrow / -	Neigung nicht angegeben	Ja
Frantzich-1 [41]	1994	E	\searrow / 32°	Theater	Nein
Frantzich-2	1994	E	\searrow / 26°		Nein
Frantzich-3 [35]	1996	E	$\nearrow \searrow$ / 45°	Geschw. der Lauflinie ang. $v > 1,5 \frac{m}{s}$ wahrsch. Fehler	Ja
Frantzich-4	1996	E	$\nearrow \searrow$ / 32°		Ja
Ye [47]	2008	F	\searrow / $26,6^\circ$ \nearrow / $25,1^\circ$	U-Bahn Station Shanghai	Nein
Chen [40]	2010	F	\searrow / $24,4^\circ$ \nearrow / $25,8^\circ$	U-Bahn Station Shanghai	Nein
Mueller-1 [16]	2010	E	\searrow / 33°	Stadion	Nein
Mueller-2	2010	E	\searrow / 27°	Stadion	Nein
Seer-1 [46]	2010	E	\nearrow / -	U-Bahn Station	Nein
Seer-2	2010	E	\nearrow / -	U-Bahn Station	Nein
Seer-3	2010	F	\nearrow / -	Stadion	Nein

4.2 Eigene Experimente

Die eigenen Experimente für die Analyse der Leistungsfähigkeit von Treppen umfassen sowohl Feldstudien als auch Experimente unter Laborbedingungen. Im Rahmen der Feldstudien wurden sieben Messungen auf Außentreppen der ESPRIT arena in Düsseldorf (Deutschland) durchgeführt. Die drei umfangreicheren Messungen fanden in den Treppenhäusern T5, T6 und T7 am

12.04.2009 nach dem Fußballspiel «Bayer Leverkusen» gegen «Werder Bremen» (1:1)³ statt. Alle Treppenhäuser weisen die gleiche Geometrie auf (vergleiche Kapitel 4.2.1). Bei den Aufnahmen sind die Personen mit kurzärmeligen Oberteilen und teilweise dünnen Sommerjacken leicht bekleidet⁴. Nach dem Fußballspiel «Bayer Leverkusen» gegen «Bayern München» (4:2) am 04.03.2009 wurden die vier kürzeren Videoaufnahmen im Treppenhaus T7 durchgeführt. An diesem Tag trugen nahezu alle Personen dickere Winterjacken⁵. Insgesamt sind in den sieben Videoaufnahmen 5.832 Personen erfasst worden.

Experimente unter Laborbedingungen wurden im Rahmen des Forschungsprojektes HERMES, ebenfalls auf den Außentreppen und den Tribünentreppen der ESPRIT arena, durchgeführt. Insgesamt waren bis zu 300 Personen, ein Großteil davon Studenten, involviert. Jeder Teilnehmer erhielt pro Tag eine Aufwandsentschädigung von 50 Euro. Das mittlere Alter der Probanden betrug $25 \pm 5,7$ Jahre und im Durchschnitt waren die Testpersonen $1,76 \pm 0,09$ m groß. Bei 42 Personen wurde die freie Gehgeschwindigkeit von $v_0 = 1,55 \pm 0,18$ m/s in einem horizontalen Korridor ermittelt. Jeder Versuch begann mit folgender Durchsage: «Sehr geehrte Damen und Herren, es ist ein technischer Defekt aufgetreten. Es besteht keine direkte Gefährdung. Bitte verlassen Sie zügig auf direktem Weg und ohne zu drängeln das Gebäude.»

4.2.1 Aufbau und Geometrie

Abbildung 4.7 zeigt eine Skizze der Außentreppe sowie den extrahierten Trajektorienansatz aus dem Experiment «Treppe abwärts» (T5) (vergleiche Tabelle 4.8). Die Treppe ist überdacht, windgeschützt und verfügt über gute Lichtverhältnisse. Auf der Innenseite reduziert der Handlauf die effektive Breite um 7 cm; auf der Außenseite ist der Handlauf auf das Treppengeländer aufgesetzt und nimmt keinen Einfluss auf die effektive Breite.

Insgesamt wurden sechs verschiedene Experimente (T1 bis T6) auf der Außentreppe durchgeführt (siehe Tabelle 4.8). Die Einrichtung eines Wartebereichs stellte eine identische Startdichte für jeden Durchlauf sicher. Über die variable Breite des Eingangs b von 0,8 bis 2,4 m, d. h. den Zustrom, erfolgte die Regulierung der Personendichte auf der Treppe. An den Eingang schließt sich ein ca. 2,5 m langes Podest an. Diese Distanz erlaubte den Testpersonen die Wahl ihrer Wunschgeschwindigkeit sowie eine Verteilung über die gesamte Treppenbreite w . Die Geometrie der Treppe ist charakterisiert durch den Treppenauftritt von $a = 0,28$ m und die Treppensteigung von $s = 0,18$ m; dies entspricht einer Neigung von $32,7^\circ$.

Abbildung 4.7a zeigt die Bauweise der Treppe. Die Übergänge zwischen den Treppenpodesten und den Treppenläufen sind in der Grafik mit Ziffern von 1 bis 4 gekennzeichnet. Übergänge 1 und 4 können mit der mikroskopischen Messmethode aufgrund fehlender Trajektorienpunkte

³Das Endergebnis des Fußballspiels ist angegeben, weil es einen Hinweis auf die Motivation der Zuschauer beim Verlassen des Stadions geben kann. Subjektiv konnten in den Videos jedoch keine Unterschiede wahrgenommen werden.

⁴Uhrzeit ca. 19:00 Uhr, Tagesmitteltemperatur ca. 14°C .

⁵Uhrzeit ca. 22:30 Uhr, Tagesmitteltemperatur ca. 6°C .

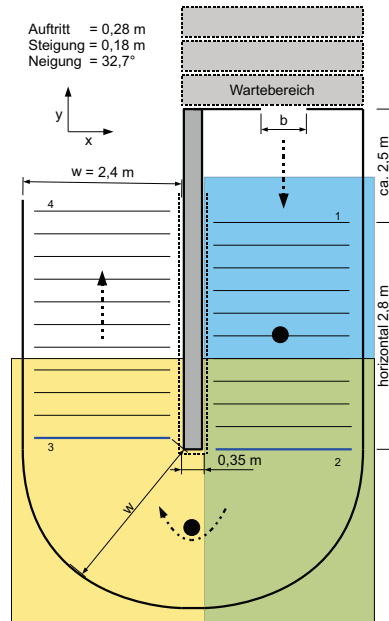
vor bzw. hinter des Übergangs nicht analysiert werden. Folglich ist nur eine Auswertung der Übergänge 2 und 3 (markiert mit blauen Linien) in Kombination mit der Kehre möglich.

Neben den Experimenten auf der Außentreppe wurden ebenfalls Versuche auf den Tribünentreppen durchgeführt (siehe Abbildung 4.8). Die Tribünentreppen weisen eine Breite von 1,2 m auf, die Neigung beträgt im Unterrang ca. 27° und im Oberrang ca. 35° . Eine besondere Eigenschaft der Tribünentreppen ist die leicht parabolische Form, d. h. die Neigung der Treppe wird mit jeder Stufe (gezählt von unten nach oben) steiler. Für die Analyse des Fundamentaldiagramms wurde ein Messfeld von $A_m = 1,2 \text{ m} \cdot 2,0 \text{ m} = 2,4 \text{ m}^2$ gewählt. Weitere Informationen zur Geometrie und Bemaßung können Abbildung 5.2 entnommen werden.

Die deutsche Norm DIN 18065 liefert Empfehlungen für die Auslegung von Gebäudetreppen (vergleiche Kapitel 2.3). Die bequeme bzw. sichere Begehbarkeit von Treppen kann anhand der Gleichungen 2.2 und 2.3 geprüft werden. Für die Außentreppe liegt der Wert für die bequeme Begehbarkeit bei 10 cm (empfohlen ist 12 cm) und das Kriterium der sicheren Begehbarkeit wird mit einem Wert von 46 cm erfüllt. Für die parabolisch geformten Tribünentreppen mit $s_{\min} = 12 \text{ cm}$ und $a_{\text{konst.}} = 26,5 \text{ cm}$ sowie $s_{\max} = 17,2 \text{ cm}$ und $a_{\text{konst.}} = 26,5 \text{ cm}$ ergeben sich Bereiche für die bequeme Begehbarkeit von 9,3 bis 14,5 cm und für die sichere Begehbarkeit von 38,5 bis 43,7 cm.

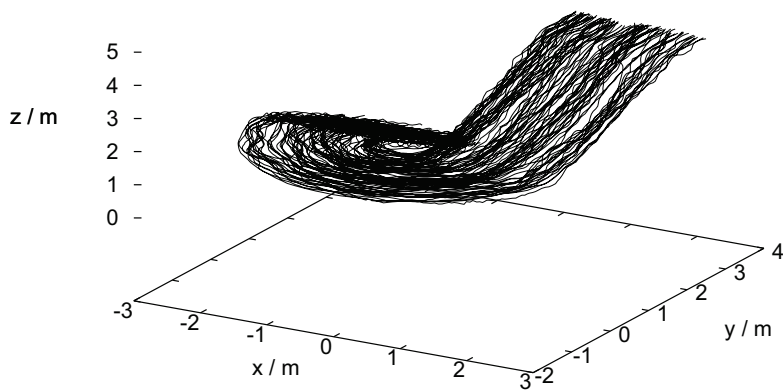
Tabelle 4.8: Randbedingungen für das Experiment «Treppe abwärts». Als Zeit ist die Zeitspanne des Überschreitens der ersten und der letzten Person am Übergang 3 (vgl. Abbildung 4.7a) angegeben.

Durchlauf	Breite des Eingangs / m	N / -	Zeit / min
T1	b = 2,40	303	2:20
T2	b = 1,40	197	1:31
T3	b = 1,20	199	1:36
T4	b = 1,00	192	1:43
T5	b = 0,90	96	0:56
T6	b = 0,75	93	1:02



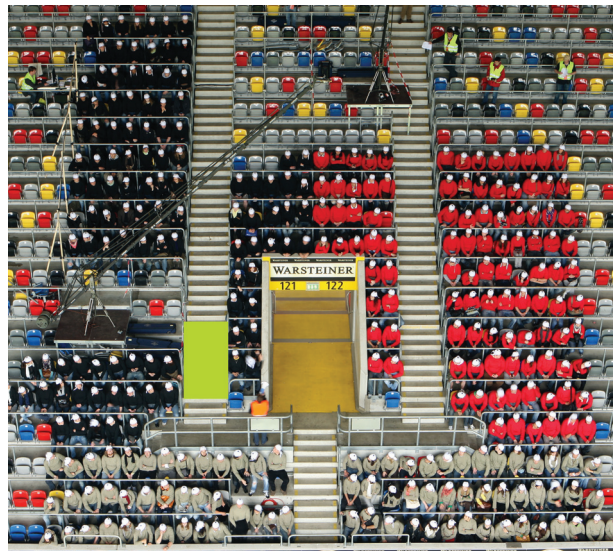
(a) Skizze

Experiment T5

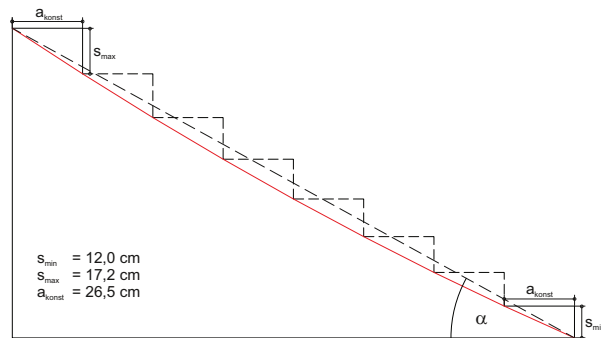


(b) Trajektorien

Abbildung 4.7: (a) Skizze der Außentreppe. Das Sichtfeld der Kameras (schwarze Kreise) ist markiert: Kamera 1 = blau, Kamera 2 = gelb und der Überschneidungsbereich ist grün dargestellt. (b) Extrahierter Trajektoriensatz aus dem Experiment T5.



(a) Foto



(b) Skizze

Abbildung 4.8: (a) Foto (von Jan Ovelgönne) vom Oberrang der ESPRIT arena mit Visualisierung des Messfeldes A_m . (b) Skizze der parabelförmigen Treppe.

4.2.2 Feldstudien

Abbildung 4.9a zeigt einen Vergleich der Fundamentaldiagramme hergeleitet aus den Feldstudien und den Laborexperimenten auf der Außentreppe. Die Messpunkte zeigen eine gute Übereinstimmung über den gesamten Dichtebereich mit einem Trend zu höheren spezifischen Personenflüssen in den Experimenten unter Laborbedingungen. In den Experimenten tritt ein maximal spezifischer Fluss von $1,1 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ über den Dichtebereich von $1,0$ bis $2,0 \text{ m}^{-2}$ (Einzelwert $1,52 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ bei $1,9 \text{ m}^{-2}$) auf. Die Messpunkte der Feldstudien zeigen ebenfalls eine Kapazität von $1,1 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ (ein Ausreißer bleibt unberücksichtigt). Der maximale spezifische Fluss entsteht bei einer Dichte von $1,5 \text{ m}^{-2}$. Insgesamt fällt auf, dass in den Feldstudien höhere maximale Dichten bis $3,4 \text{ m}^{-2}$ aufgetreten sind. Anhand der vorliegenden Datensätze kann keine Flussreduzierung aufgrund einer Überfüllung der Treppe festgestellt werden. Es scheint, dass sich der spezifische Fluss für höhere Dichten einem konstanten Wert nähert.

Die zeitliche Entwicklung des spezifischen Personenflusses auf der Außentreppe 5 während der Feldstudie ist in Abbildung 4.9b dargestellt. Drei Phasen sind sichtbar: ein Anstieg des Personenflusses nach Ende des Fußballspiels, ein nahezu konstanter Fluss mit leicht abnehmender Tendenz von Sekunde 260 bis 1100 gefolgt von einer deutlichen Flussreduzierung. Über 14 Minuten, während der Hauptentleerungsphase, wird ein mittlerer spezifischer Fluss von $\overline{J_s} = 0,73 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ gemessen. Aufgrund einer normalen Entleerung des Stadions nach einem Fußballspiel gehen die Zuschauer entspannt und ohne jegliche Anzeichen von Hektik.

In Abbildung 4.9c ist die zeitliche Entwicklung der mittleren Dichte visualisiert. Zwischen Sekunde 200 und 500 ist ein deutlicher Anstieg der Dichte bis etwa $3,3 \text{ m}^{-2}$ zu erkennen. Danach fällt die Dichte auf der Treppe bis etwa Sekunde 1100 ab, gefolgt von Einzelwerten mit Dichten bis $3,4 \text{ m}^{-2}$ und einer deutlichen Dichtereduzierung. Im Gegensatz zur zeitlichen Entwicklung des spezifischen Flusses ist keine Zeitspanne sichtbar, bei der die Dichte um einen Mittelwert schwankt.

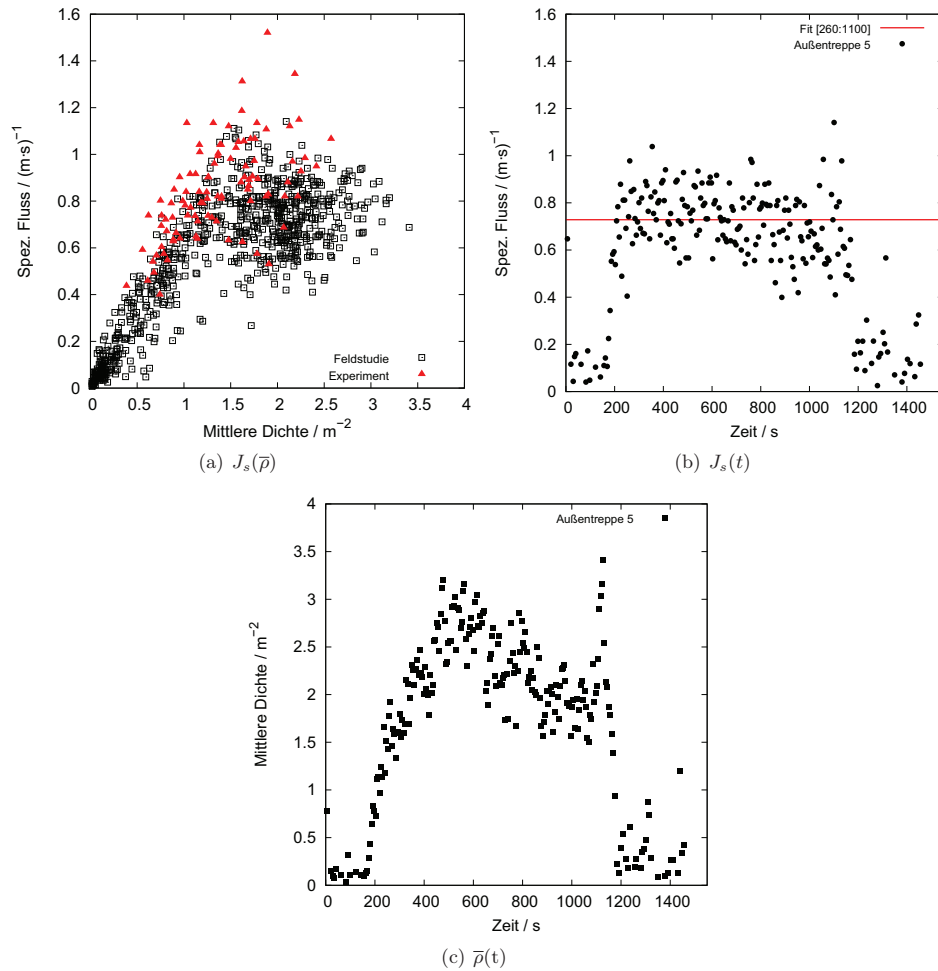


Abbildung 4.9: (a) Fundamentaldiagramm für «Treppen abwärts» basierend auf den Datensätzen der Feldstudie und den Experimenten unter Laborbedingungen (Außentreppe). Es wurde die makroskopische Messmethode zur Auswertung genutzt. Die zeitliche Entwicklung des spezifischen Flusses und der mittleren Dichte während der Feldstudie auf der Außentreppe sind in (b) und (c) dargestellt. Über 14 Minuten wurde ein mittlerer spezifischer Fluss von $\overline{J_s} = 0,73 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$ gemessen.

4.2.3 Experimente unter Laborbedingungen

Bei der mikroskopischen Analyse der Treppenexperimente wurden vorrangig drei Schwerpunkte gesetzt. Es wird gezeigt, wie schwer die Auswahl des stationären Zustandes bei Fußgängerexperimenten ist. Anschließend werden die Fundamentaldiagramme diskutiert und verglichen. Die Kartendarstellung der Basisgrößen mittels der Voronoi-Messmethode liefert neue Erkenntnis-

se bezüglich der räumlichen Abhängigkeit von Basisgrößen auf der Treppe mit anschließender 180° Kehre.

4.2.3.1 Stationärer Zustand

Um allgemeingültige Aussagen über das Fundamentaldiagramm treffen zu können, ist zur Berechnung die Betrachtung des stationären Zustandes, d. h. ein zeitunabhängiger Zustand der Basisgrößen eines Systems, notwendig. Bezogen auf die Fußgängerexperimente auf der Treppe bedeutet dies, dass Einflüsse auf die Fußgängerbewegung aufgrund verschiedener Startbedingungen ausgeschlossen werden müssen. Unabhängig davon, ob in diesem Experiment 300 Personen oder nach einem Fußballspiel 10.000 Personen die Treppe benutzen, wird sich die Dauer der Anfangs- und Endphase nur geringfügig verändern; die Dauer des stationären Zustands wird signifikant ansteigen. Folglich ist das der entscheidende Auslastungszustand, den es zu verstehen gilt, und der für die Bemessung von Rettungswegen als Kriterium herangezogen werden sollte.

Abbildung 4.10 zeigt drei verschiedene Diagramme, die zur manuellen Beurteilung des zeitunabhängigen Bereiches genutzt wurden. Über das $N(t)$ -Diagramm, Durchtrittszeiten sind an der Messlinie $y = 1,5\text{ m}$ (vgl. Abbildung 4.7b erste Treppe) erfasst worden, erfolgt indirekt eine Betrachtung des Personenflusses auf der Treppe. Schwankungen sind jedoch nur schwer erkennbar. Es kann nur eine grobe Abschätzung vorgenommen werden. Zu Beginn eines Experimentdurchlaufs ist die Treppe leer und die ersten Testpersonen können ihre Gehgeschwindigkeit frei wählen, müssen sich nicht der Bewegung des Personenstroms anpassen. Die Personendichte auf der Treppe steigt langsam an. Der zeitliche Verlauf der Dichte – das Messfeld $A_T = 2,4\text{ m} \cdot 1,5\text{ m} = 3,6\text{ m}^2$ befindet sich mittig auf der Treppe und erstreckt sich über die gesamte Breite – zeigt deutlich drei verschiedene Phasen: Anstieg der Personendichte im Messfeld beim Start des Experiments bis etwa 40 s, von 40 bis 100 s einen stationären Zustand, bei dem die Dichte um den Wert $\rho = 2,3\text{ m}^{-2}$ schwankt und eine Reduzierung der Dichte ab Sekunde 100. Eine Betrachtung der zeitabhängigen Geschwindigkeit zeigt diese Phasen nicht so deutlich.

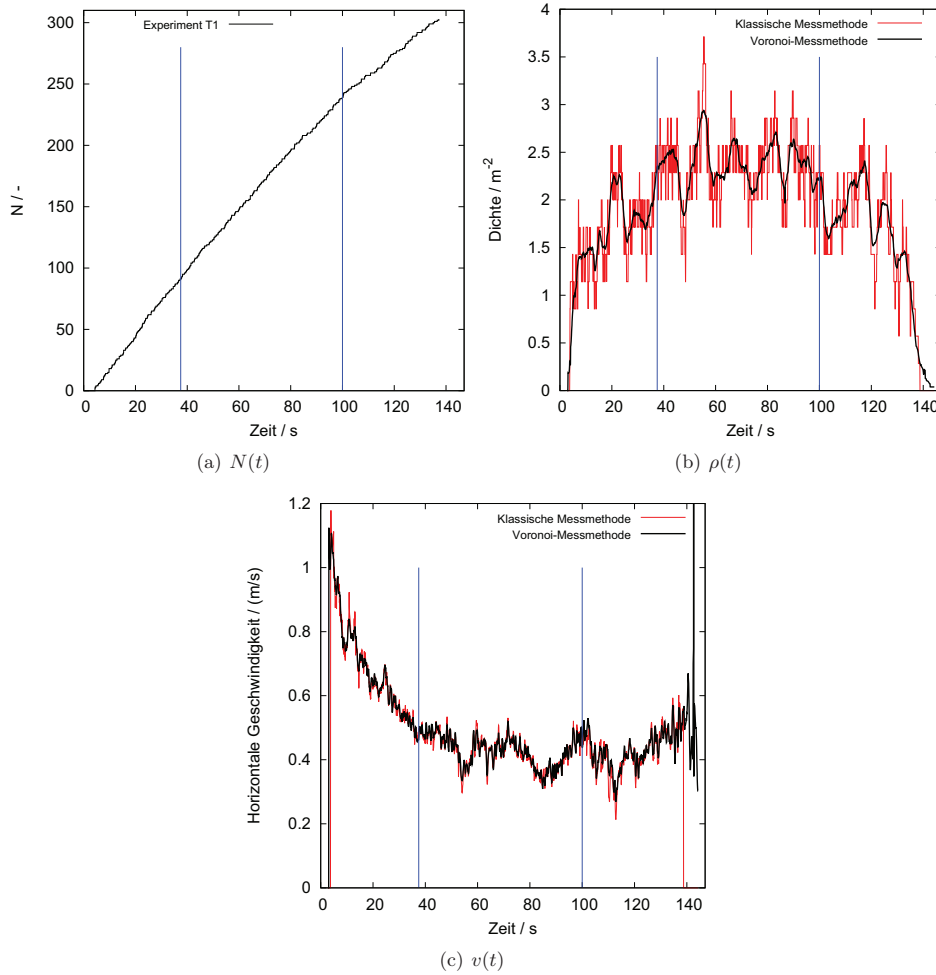


Abbildung 4.10: Manuelle Auswahl des stationären Zustands für Experiment T1, Anfang und Ende sind mit vertikalen blauen Linien markiert, anhand der (a) Durchtrittszeiten an einer Messlinie ($y = 1,5 \text{ m}$) und den Zeitreihen von (b) Dichte und (c) horizontaler Geschwindigkeit.

4.2.3.2 Fundamentaldiagramm

Die in Abbildung 4.11 präsentierten Fundamentaldiagramme für «Treppen abwärts» wurden mit der Voronoi-Messmethode während des stationären Zustands ermittelt. Um die Anzahl der Datenpunkte zu reduzieren und die Ergebnisse deutlicher darzustellen wird ein Messwert pro Sekunde genutzt. Die Berechnung des spezifischen Personenflusses erfolgte über die Flussgleichung: $J_s = \overline{\rho_v} \cdot \overline{v_v}$.

Abbildung 4.11a zeigt das Fundamentaldiagramm der Außentreppe mit den spezifischen Messpunkten für jeden Durchlauf. Es kann ein Dichtebereich von $0,6$ bis $2,9\text{ m}^{-2}$ betrachtet werden. Bis zu einer Dichte von $1,5\text{ m}^{-2}$ kann ein linearer Anstieg des Personenflusses beobachtet werden. Das entspricht einer freien Gehgeschwindigkeit von ca. $0,7\text{ m/s}$. Der maximale spezifische Fluss von $1,3(\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ wurde bei einer Dichte von etwa $2,0\text{ m}^{-2}$ gemessen. Eine Reduzierung des Personenflusses aufgrund einer Überbelegung der Treppe ist nicht ersichtlich. Für Dichten größer $2,0\text{ m}^{-2}$ scheint sich der Personenfluss einem konstanten Wert zu nähern.

In Abbildung 4.11b/c werden die Fundamentaldiagramme der Außen- ($32,7^\circ$) und Tribünentreppen (Oberrang $\approx 35^\circ$ und Unterrang $\approx 27^\circ$) verglichen. Die Messpunkte der Außentreppe und der Tribünentreppe im Oberrang, mit ähnlichen Neigungen aber unterschiedlichen Breiten, stimmen gut miteinander überein. Die doppelte Breite der Außentreppe nimmt also keinen Einfluss auf das Fundamentaldiagramm. Dass sich die Neigung auf das Verhältnis von Geschwindigkeit bzw. Fluss zu Dichte auswirkt, belegt der Vergleich mit der flacheren Tribünentreppe im Unterrang. Es ist offensichtlich, dass die Geschwindigkeit sowie der spezifische Fluss an einer bestimmten Dichte auf der Treppe im Unterrang etwas höher ist als auf der Treppe im Oberrang oder der Außentreppe. Bei den vorgestellten Handrechenverfahren (siehe Kapitel 4.1.1) wird die Einflussgröße «Treppenneigung» nur von NM berücksichtigt.

Auf den Tribünentreppen wurden höhere Personendichten zwischen $1,3$ und $3,6\text{ m}^{-2}$ gemessen. Für Dichten größer als $3,0\text{ m}^{-2}$ deuten die Messwerte eine unterschiedliche Entwicklung an. Im Oberrang scheint der spezifische Personenfluss mit steigender Dichte abzunehmen, während der spezifische Fluss im Unterrang ansteigt. Die präsentierten Fundamentaldiagramme von NM zeigen für Dichten größer als $3,0\text{ m}^{-2}$ sowohl für eine Neigung von 26° als auch für 37° eine abnehmende Tendenz des Flusses.

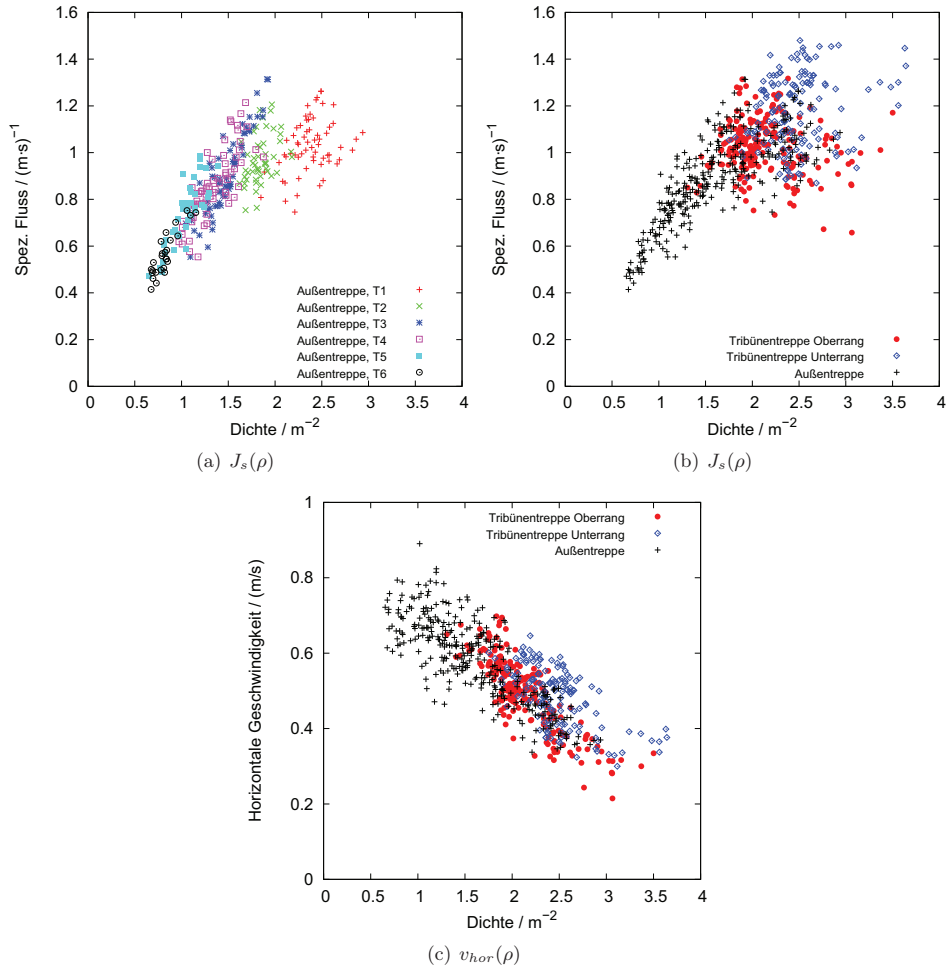


Abbildung 4.11: (a) Fundamentaldiagramm der Außentreppe. Die Messpunkte sind den einzelnen Durchläufen zugeordnet. (b) und (c) Vergleich der Fundamentaldiagramme für «Treppen abwärts» basierend auf den Datensätzen der Experimente: Außentreppe (32,7°), Tribünen- und Außentreppe Unterrang ($\approx 27^\circ$) und Tribünen- und Außentreppe Oberrang ($\approx 35^\circ$). In allen Diagrammen wurde die Flussgleichung zur Berechnung des spezifischen Personenflusses genutzt: $J_s = \bar{\rho}_v \cdot \bar{v}_v$.

4.2.3.3 Kartendarstellung der Basisgrößen

In Kapitel 3.3.2 wurde bereits beschrieben, dass mit der Voronoi-Methode bspw. die Dichte in Bereichen gemessen werden kann, die kleiner sind als die Projektionsflächen der Personen. Dadurch können lokale Unterschiede der Basisgrößen quantifiziert werden, die mit einer makroskopischen Messmethode durch die Mittelwertbildung unberücksichtigt bleiben. Für die Experimente auf der Außentreppe erfolgte eine Unterteilung der gesamten Geometrie in Quadrate mit 10 cm Kantenlänge (siehe Abbildung 4.12). Dichte und Geschwindigkeit wurden frameweise

für jedes Quadrat bestimmt. Die Karten präsentieren den zeitlichen Mittelwert über die gesamte Dauer des stationären Zustandes (vergleiche Kapitel 4.2.3.1). Da die Zellen im Randbereich durch die Umfassungsbauteile der Treppe angeschnitten werden, weichen die hier berechneten Mittelwerte für Dichte und Geschwindigkeit nach unten ab.

In Abbildung 4.12 werden für den stationären Zustand die Mittelwerte der Basisgrößen – Dichte, horizontale Geschwindigkeit und spezifischer Personenfluss – dargestellt. Über eine Farbkodierung wird die räumliche Abhängigkeit dieser Basisgrößen deutlich. Die Inhomogenität der Zustandsgrößen ändert sich signifikant mit der Treppenauslastung. In T1 beträgt die maximale Dichte knapp 3 m^{-2} , während in T3 und T6 maximale Werte von 2,2 und $1,2\text{ m}^{-2}$ auftraten.

Die erste Spalte zeigt die Dichteverteilung. In T1 wird die Treppe maximal ausgelastet, die höchsten Dichten traten mittig im oberen Treppenlauf und an der Kehre auf. Für eine geringere Auslastung bewegte sich der Bereich höchster Dichte in Richtung des unteren Treppenlaufs. In der Kehre werden fünf Bereiche unterschieden: rot, gelb, grün, hellblau und dunkelblau. Der Bereich niedriger Dichte (dunkelblau) vergrößert sich mit geringerer Treppenauslastung (T1 bis T6). Spalte zwei zeigt die entsprechende Geschwindigkeits-Karte, welche nahezu der inversen Struktur der Dichteverteilung entspricht.

Über das Produkt der entsprechenden Dichte- und Geschwindigkeitszellen wurde die spezifische Fluss-Karte ermittelt. Diese gibt Information darüber, wie stark ein Bereich von den Fußgängern frequentiert wird; die Struktur ändert sich nur gering bei unterschiedlicher Treppenauslastung. Maximale Flusswerte können mittig in der Kehre festgestellt werden. Nur für niedrige Dichten verschiebt sich dieser Bereich zur Innenseite. Besonders in T1, dem Experiment mit dem höchsten effektiven Fluss, können deutliche Strukturunterschiede nahe der Übergänge 2 und 3 (vgl. Abbildung 4.7a) vom ersten Treppenlauf zum Podest ($y = 0,17\text{ m}$) und vom Podest zum zweiten Treppenlauf ($y = 0,44\text{ m}$) erkannt werden. Diese Unterschiede in der Fluss-Karte deuten effektive Engstellen an. Folglich kann angenommen werden, dass die Leistungsfähigkeit einer Treppe durch eine niedrigere Anzahl von Übergängen, bspw. weniger Zwischenpodeste, erhöht werden kann. Anhand der Summenbildung in jedem Abschnitt wurde geprüft, dass die Kontinuität gewährleistet bleibt.

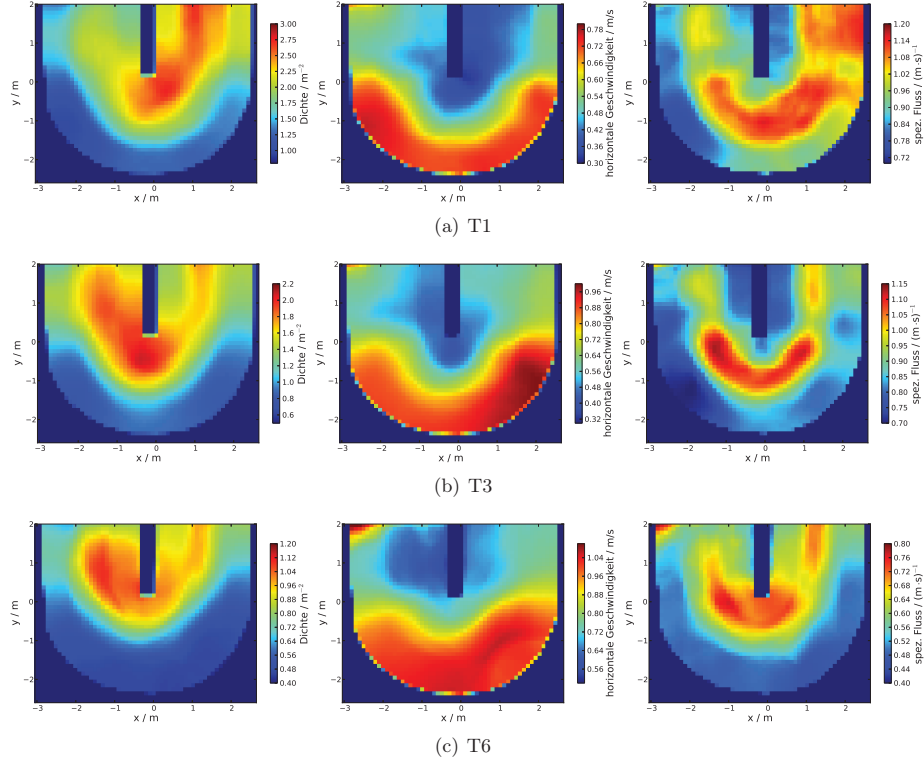


Abbildung 4.12: Kartendarstellungen der Experimente T1, T3 und T6 auf der Außentreppe während des stationären Zustandes mit $\Delta x = \Delta y = 0,10$ m. Der Eingang befindet sich mittig rechts oben und die Bewegungsrichtung ist im Uhrzeigersinn (vgl. Abbildung 4.7). Für jedes Experiment ist die Skalierung angepasst, um die unterschiedlichen Strukturen zu verdeutlichen. Übergänge 2 und 3 befinden sich bei: $y = 0,17$ m und $y = 0,44$ m.

4.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der aktuelle Stand der Forschung bezüglich des Fundamentaldia-gramms für Treppen zusammengefasst und um eigene Messungen ergänzt. Einen guten Über-blick liefern die vier Planungshandbücher, allerdings zeigen die vorgestellten Fundamentaldia-gramme nur für niedrige Dichten eine gute Übereinstimmung. Maximale spezifische Flusswerte für die Abwärtsbewegung von $1,25 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$ und Aufwärtsbewegung von $1,22 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$ konnten mit experimentellen Daten belegt werden. Die eigene Feldstudie auf der Außentreppe T5 hat gezeigt, dass diese Werte jedoch Maximalwerte sind und nicht über einen längeren Zeitraum während der Entleerung eines Stadions aufrecht erhalten werden können. Über 14 Minuten wurde ein mittlerer spezifischer Fluss von $0,73 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$ gemessen. PM beschreiben in ihrem Handbuch Fundamentaldia-gramme bis zu einer Dichte von $9,2 \text{ m}^{-2}$, in den vorgestellten Expe-rimenten beträgt die maximal gemessene Personendichte $3,6 \text{ m}^{-2}$. Nach WM und NM müsste

eine deutliche Reduzierung des Personenflusses ab einer Dichte von $3,0 \text{ m}^{-2}$ sichtbar sein. Dies wird durch die experimentelle Datenbasis nicht bestätigt. Bezogen auf die Abwärtsbewegung zeigen unsere Experimente gegensätzliche Entwicklungen. Für das Fundamentaldiagramm der Außentreppe ist zu erkennen, dass sich der spezifische Fluss für Dichten größer als $2,0 \text{ m}^{-2}$ einem konstanten Wert nähert. Das Fundamentaldiagramm der Tribünentreppe im Unterrang deutet an, dass der spezifische Fluss mit höherer Dichte ansteigt, während auf der Tribünen-treppe im Oberrang der Personenfluss mit steigender Dichte abfällt.

Müller und Frantziß analysierten den Einfluss unterschiedlicher Treppenneigungen auf das Fundamentaldiagramm. Der Vergleich der Messwerte zeigt, dass eine Änderung der Treppen-neigung von ca. 10° einen geringen Einfluss auf das Fundamentaldiagramm hat. Graat [42] beschreibt in seiner Veröffentlichung, dass die mittlere Kapazität einer Treppe von 38° Nei-gung bei normaler Motivation $0,09 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ niedriger ist als einer Treppe mit einer Neigung von 30° . Nach NM liegt die Kapazität von Treppen mit 26° Neigung bei $1,2 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ und ist bei einer Neigung von 37° um $0,3 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ reduziert. Der Vergleich der eigenen Experimente auf den Tribünen-treppen untereinander und mit der Außentreppe belegt, dass die Treppenneigung Einfluss auf das Fundamentaldiagramm nimmt. Eine unterschiedliche Treppenbreite hat die empirische Beziehung von Fluss und Dichte in den eigenen Experimenten nicht verändert.

Die Durchführung von Feldstudien und Experimenten unter Laborbedingungen auf derselben Treppe ermöglicht einen direkten Vergleich der Datensätze. In der Feldstudie wurden maximale Dichten bis $3,4 \text{ m}^{-2}$ gemessen, im Experiment nur bis $2,9 \text{ m}^{-2}$. Die entsprechenden spezifischen Flusswerte einer bestimmten Dichte waren im Experiment minimal höher. Momentan ist ein automatisches und präzises *tracken* von Personen ohne vorbereitete Mützen mit Markern nicht möglich, deshalb können Basisgrößen in Feldstudien ohne erheblichen Mehraufwand nur auf makroskopischer Ebene ermittelt werden. Der Vergleich von makroskopischer und mikrosko-pischer Messmethode hat jedoch gezeigt, dass die makroskopische Methode für einen ersten Überblick gute Ergebnisse bezüglich der Kenngrößen liefert.

Mit der Kartendarstellung kann ein tieferer Einblick in die Fußgängerdynamik auf Treppen gewonnen werden. Es wird die unterschiedliche räumliche Nutzung der Treppe in Abhängigkeit der Treppenauslastung deutlich. An den Übergängen von Treppe zu Podest bzw. von Podest zu Treppe ist besonders bei höheren Dichten eine klare Strukturänderung sichtbar. Das deu-tet an, dass die Übergänge den flussreduzierenden Faktor darstellen. Kritische Dichten unter Staubedingungen können auf der Innenseite vor der Kehre erwartet werden.

Kapitel 5

Fußgängerverkehr auf Tribünen

Dieses Kapitel beginnt mit einer kurzen Einleitung, die den Grundgedanken der Festlegung maximaler Rettungsweglängen und minimaler Rettungswegbreiten noch einmal aufgreift. Anschließend werden unterschiedliche Personenführungen auf Tribünen vorgestellt. Es folgt eine detaillierte Beschreibung und Auswertung eigener Experimente, in denen der Personenfluss auf Tribünen und weitere Einflussgrößen analysiert und quantifiziert werden.

5.1 Einleitung

Für die Auslegung von Rettungswegen in Stadien, oder allgemein in Versammlungsstätten, gibt es in Deutschland strikte Vorgaben (vergleiche Kapitel 2.3). Forell [57] hat die gesetzlichen Regelungen für die Auslegung von Rettungswegen von acht europäischen Ländern, China und der USA miteinander verglichen. Beispielsweise hat Forell herausgefunden, dass es eine große Spanne der angenommenen Personendichte von $0,5$ bis $4,0 \text{ m}^{-2}$ in Versammlungsstätten gibt. Einige Länder definieren eine schrittweise Verbreiterung der Rettungswege in $0,6\text{-m}$ -Schritten (Deutschland, Italien, Schweiz) oder $0,4 \text{ m}$ (Österreich). Die schrittweise Verbreiterung basiert auf der Idee, dass eine Erhöhung des Personenflusses nur möglich ist, wenn eine neue Linie ausgebildet werden kann. Diese Annahme ist jedoch durch aktuelle Forschungsergebnisse widerlegt. Diese zeigen, dass der Fluss linear mit der Korridorbreite ansteigt [14, 15].

In der MVStättV sind ebenfalls Anforderungen an die Rettungsweglänge und -breite formuliert. Was ist der Grundgedanke bei der Festlegung von maximalen Rettungsweglängen und minimalen Rettungswegbreiten? Im Mittelpunkt steht die maximale Räumungszeit einer Anlage. In Szenarien mit niedrigen Personendichten, in denen die freie Gehgeschwindigkeit der Personen nicht eingeschränkt ist, ergibt sich die maximale Räumungszeit aus der Rettungsweglänge dividiert durch die Gehgeschwindigkeit. In der Erläuterung zur MVStättV (siehe Kapitel 2.3) wird davon ausgegangen, dass 100 Personen eine $1,2 \text{ m}$ breite Tür innerhalb von ca. 60 s pas-

sieren können; das entspricht einem spezifischen Fluss von $1,39 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$. Eine Verbreiterung der Tür um 0,6 m würde nach der MVStättV dazu führen, dass sich eine weitere Linie ausbilden kann und 100 Personen die Tür schneller durchschreiten können, was einem höheren effektiven Personenfluss in der Tür entspricht. Anders formuliert wird angenommen, dass eine bestimmte Rettungswegbreite einen gewissen effektiven Personenfluss zulässt. Basierend auf dieser Annahme wird also die maximale Räumungszeit durch die Rettungswegbreite indirekt limitiert. Im Rahmen des Forschungsprojektes HERMES wurden Experimente in Korridoren mit unterschiedlicher Breite (auch bi-direktionaler Personenfluss), Ecken, T-Kreuzungen, Treppen und der Tribüne eines Fußballstadions durchgeführt [4, 16–18]. Die Ergebnisse zeigen, dass unterschiedliche Geometrien gleicher Breite verschiedene Kapazitäten erlauben. Das bedeutet ebenfalls, dass eine Abschätzung von Räumungszeiten, ausschließlich basierend auf der Rettungswegbreite, nicht sinnvoll ist.

Unabhängig von geltenden Verordnungen sind zahlreiche weitere Einflussgrößen (Wetter, Uhrzeit, Motivation, Alkoholkonsum, Kenntnis des Gebäudes, ...) denkbar, welche die Räumungszeit signifikant beeinflussen können. Auf diese Faktoren kann der Stadionbetreiber jedoch nur bedingt einwirken. Die Positionierung von Sicherheitspersonal, welches eine Eingangskontrolle in den Blöcken vornimmt oder im Gefahrenfall den Räumungsvorgang unterstützen soll, kann allerdings durch Anweisungen geplant werden. Wo sollte das Sicherheitspersonal jedoch optimaler Weise positioniert werden, damit sie nicht als Hindernis agieren?

Viele deutsche Bundesligastadien nutzen Tribünen mit einem 2-Rang-System, dem Unter- und Oberrang. Um die Distanz zum Spielfeld zu verringern und die Sicht der Zuschauer zu verbessern, ist der Oberrang häufig steiler ausgelegt. Bezogen auf die Breite von Rettungswegen unterscheidet die MVStättV nicht zwischen verschiedenen Neigungen. Ist also der effektive Personenfluss eines 1,2 m breiten Rettungsweges im Oberrang vergleichbar mit dem im Unterrang?

5.2 Unterschiedliche Personenführung auf Tribünen

Die Bauweise deutscher Bundesligastadien, ob Multifunktionsarena oder reines Fußballstadion, ist verschieden. Folglich gibt es auch beim Design der Tribünen Unterschiede. Neben gültigen Vorschriften (siehe Kapitel 2.3), beispielsweise Blöcke von maximal 30 Sitzplatzreihen oder einer maximalen Weglänge vom Sitzplatz bis Ausgang von 60 m, muss die Personenführung in der Tribüne mit dem gesamten Rettungswegkonzept des Gebäudes abgestimmt sein. In der ESPRIT arena beispielsweise werden die Zuschauer von der Tribüne über das Mundloch zur Promenade geführt, von der sie das Gebäude über die Außentreppen verlassen können. Folglich müssen die Ausgänge der Tribüne mit der Promenade verbunden sein, wodurch die Positionierung der Mundlöcher in der Tribüne eingeschränkt wird.

In Abbildung 5.1 sind drei Personenführungen skizziert, welche in deutschen Stadien vorzufinden sind. Die grünen Pfeile zeigen die Bewegungsrichtung der Zuschauer zum Ausgang, die

maximale Weglänge l_{max} vom weitest entfernten Sitzplatz zum Ausgang ist mit einer gestrichelten roten Linie eingezeichnet, und die Verkehrsfläche A_{VF} ist mit gestrichelten blauen Linien umrandet. In den Skizzen wurden einheitliche Maße gewählt, der Fokus liegt auf der Personenführung und nicht auf exakten Breiten. Szenario 1 zeigt die einfachste Form der Personenführung. Die Zuschauer werden direkt aus der Reihe über eine lange Treppe (auf- oder abwärts) zum Ausgang geführt. Neben dem Einfädelungsprozess aus der Reihe zur Treppe sind keine Richtungsänderungen notwendig. Szenario 2 spiegelt die Situation in der ESPRIT arena wider. Drei Personenströme werden über Treppen zum Mundloch geführt; zwei Personenströme Treppe abwärts kombiniert mit einer Richtungsänderung von 180° und ein Personenstrom Treppe aufwärts. Im Mundloch vereinigen sich die drei Personenströme. In Szenario 3 wird die Personenführung durch eine Gabelung oberhalb des Mundlochs ergänzt. Den Zuschauern wird die Wahl gelassen, ob sie die linke oder rechte Treppe nutzen. Bedingt durch die häufigeren Richtungswechsel von Szenario 1 zu 3 erhöht sich die Anzahl von Übergängen (horizontaler Weg zu Treppe oder Treppe zu horizontalem Weg). In Kapitel 4.2.3.3 wurde gezeigt, dass Übergänge einen negativen Einfluss auf den Personenfluss nehmen können.

Basierend auf den in Abbildung 5.1 einheitlich gewählten Längen- bzw. Breitenmaßen können die maximale Weglänge und genutzte Verkehrsfläche ermittelt und verglichen werden:

Szenario 1:

$$l_{max} = 4,4 \text{ m} + 9,3 \text{ m} = 13,7 \text{ m}$$

$$A_{VF} = 2 \cdot 1,2 \text{ m} \cdot 9,6 \text{ m} = 23,0 \text{ m}^2$$

Szenario 2:

$$l_{max} = 5,1 \text{ m} + 6,9 \text{ m} + 1,2 \text{ m} + 2,4 \text{ m} = 15,6 \text{ m}$$

$$A_{VF} = 2 \cdot 1,2 \text{ m} \cdot 4,8 \text{ m} + 4,8 \text{ m} \cdot 3,0 \text{ m} + 1,2 \text{ m} \cdot 1,8 \text{ m} = 28,1 \text{ m}^2$$

Szenario 3:

$$l_{max} = 6,9 \text{ m} + 3,9 \text{ m} + 1,8 \text{ m} + 3,0 \text{ m} + 1,2 \text{ m} + 2,4 \text{ m} = 19,2 \text{ m}$$

$$A_{VF} = 1,2 \text{ m} \cdot 3,6 \text{ m} + 4,8 \text{ m} \cdot 4,2 \text{ m} + 1,2 \text{ m} \cdot 1,8 \text{ m} = 26,6 \text{ m}^2.$$

Die Berechnungen zeigen, dass die Weglänge vom weitest entfernten Sitzplatz zum Ausgang von Szenario 1 nach 3 ansteigt. Aus ökonomischen Gesichtspunkten sind die Stadionbetreiber bemüht, Verkehrsflächen möglichst klein zu halten, weil dadurch Sitz- bzw. Stehplätze verloren gehen, die für Veranstaltungen vermietet werden könnten. Folglich stellt Szenario 1 die finanziell beste und Szenario 2 die schlechteste Gestaltung von Rettungswegen dar. Zur Bestimmung der Besucherzahl werden nach der MVStättV für Sitzplätze in Reihen und für Stehplätze zwei Besucher je m^2 Grundfläche des Versammlungsraumes (siehe Kapitel 2.3) angenommen. Für Szenario 1 und 2 bedeutet das, dass aufgrund der Verkehrsflächen 46 bzw. 56 Besucherplätze verloren gehen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Tiefe des Mundlochs die maximale Länge l_{max} um $1,8 \text{ m}$ und die Fläche A_{VF} um $4,3 \text{ m}^2$ beeinflusst. Es bleibt jedoch die Frage offen, welche Personenführung zur schnellsten Entleerung einer Tribüne führt.

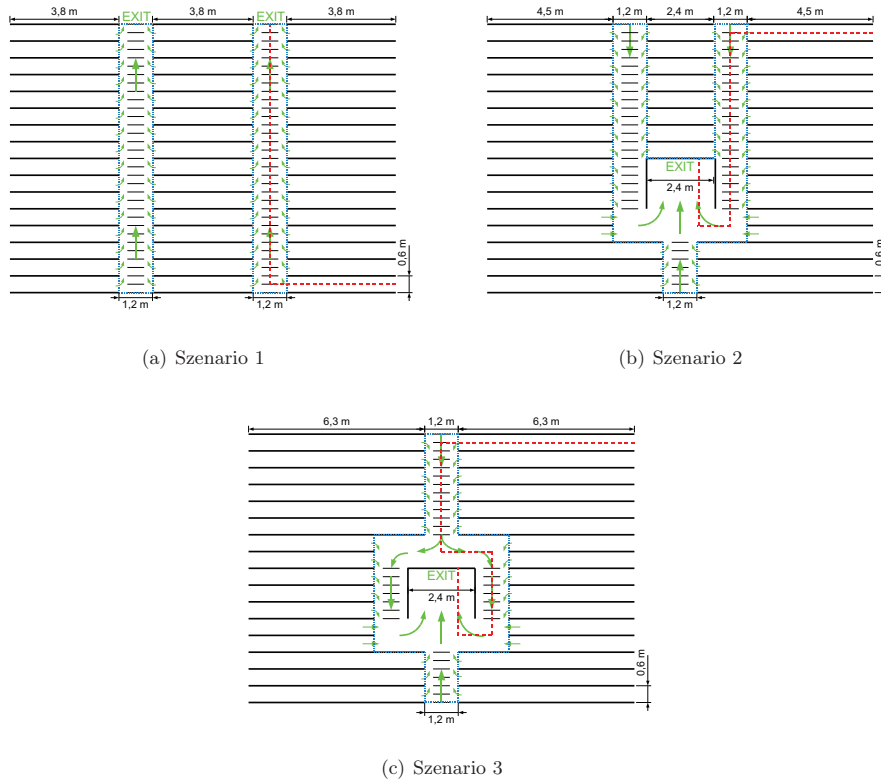


Abbildung 5.1: Tribünenendesign der Szenarien 1 bis 3.

5.3 Eigene Experimente

Bei der Analyse von Personenströmen auf Tribünen wird ähnlich vorgegangen wie bei der Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Treppen. Es werden Experimente unter Laborbedingungen genutzt, um gezielt die Bedeutung einzelner Faktoren auf den Personenfluss im Mundloch zu untersuchen. Die Experimente fanden ebenfalls im Rahmen des Forschungsprojektes HERMES in der ESPRIT arena Düsseldorf statt (vgl. Kapitel 4.2).

Zusätzlich sind in der ESPRIT arena Feldstudien nach den Fußballspielen am 13.02.2011¹ gegen den «FC Ingolstadt» (3:1) und am 27.02.2001² gegen den «VfL Osnabrück» (2:1) durchgeführt worden. Während der Entleerung wurde der Personenfluss in vier Mundlöchern gefilmt; zwei Mundlöcher im Sitzplatz- und zwei Mundlöcher im Stehplatzbereich. Insgesamt sind 2.602 Zuschauer überwiegend in Winterbekleidung erfasst worden.

¹Uhrzeit ca. 15:30 Uhr, Temperatur ca. 10 °C.

²Uhrzeit ca. 15:30 Uhr, Temperatur ca. 10 °C.

Im BORUSSIA-PARK Mönchengladbach erfolgten zwei weitere Feldstudien. Diese fanden nach den Spielen der Heimmannschaft gegen den «FSV Mainz 05» (1:0) am 18.12.2011³ und gegen den «FC Bayern München» (3:1) am 20.01.2012⁴ statt. Aufgrund der niedrigen Temperaturen trugen die Zuschauer Winterbekleidung. Insgesamt wurden bei der Entleerung 1.386 Zuschauer gefilmt.

Die manuelle zeitliche Erfassung von Zuschauern beim Überschreiten der zwei Messlinien (vgl. Kapitel 3.3.1) in den Feldstudien erfolgte im Rahmen der Arbeiten [11, 29].

5.3.1 Experimente unter Laborbedingungen

In den unter Laborbedingungen durchgeführten Experimenten werden unterschiedliche Einflussgrößen (Neigung der Tribüne, Positionierung von Ordnern, Verhältnis der akkumulierten Breiten der Zuwege zur Ausgangsbreite, unterschiedliche Startdichte) auf den Personenfluss im Mundloch und damit auf die Dauer der Entleerung einer Tribüne untersucht. Ebenfalls wird geprüft, mit welchen maximalen Personendichten im Mundloch während einer Stauung zu rechnen ist.

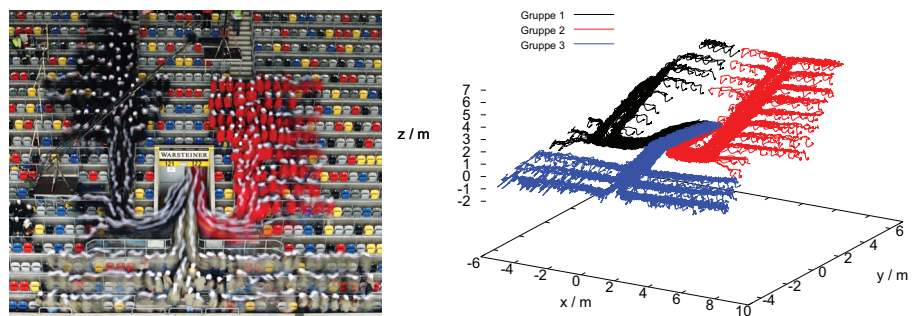
5.3.1.1 Aufbau und Geometrie

Abbildung 5.2a zeigt ein Foto mit Langzeitbelichtung des Experiments MO1v2 (siehe Tabelle 5.1). Die extrahierten Trajektorien der Testpersonen sowie eine Skizze der Tribüne mit Fokus auf das Mundloch sind in Abbildung 5.2b/c dargestellt. Alle zum 2,4 m breiten Mundloch führenden Rettungswege der Tribüne (inkl. Treppen) weisen eine Breite von 1,2 m auf. In den Sitzreihen beträgt die Durchgangsbreite 0,6 m. Die Geometrie der Tribüne im Unterrang (Neigung $\approx 27^\circ$) ist bis auf die acht angeschlossenen Sitzplätze links des Mundlochs im Oberrang (Neigung $\approx 35^\circ$) identisch. Auf die leicht parabolische Form der Tribüne wurde bereits in Kapitel 4.2.1 eingegangen.

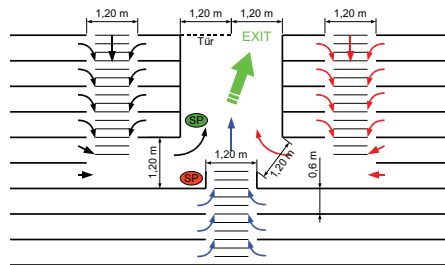
Insgesamt fanden 16 verschiedene Experimente statt, acht im Unter- und acht vergleichbare im Oberrang (siehe Tabelle 5.1). Eine Variation der Startdichte erfolgte durch das Besetzen von jedem bzw. jedem zweiten Sitzplatz. Durch das Schließen eines Türflügels erfolgte die Forcierung einer Stausituation. Das Sicherheitspersonal war so positioniert, wie es für einen normalen Stadionbetrieb typisch ist (vgl. Abbildung 5.2c).

³Uhrzeit ca. 19:30 Uhr, Temperatur ca. 5°C .

⁴Uhrzeit ca. 22:30 Uhr, Temperatur ca. 5°C .



(a) Foto mit Langzeitbelichtung. Die lotrechte Ausrichtung der unteren Stereokamera über dem Mundloch ist zu erkennen. (b) Kumulativer Trajektoriensatz jeder einzelnen Person über den gesamten Experimentdurchlauf. Details wie das Aufstehen vom Sitzplatz sind sichtbar.



(c) Skizze der Tribüne mit Fokus auf das Mundloch.

Abbildung 5.2: (a) Foto (von Jan Ovelgönne) und (b) extrahierte Trajektorien des Experiments MO1v2. (c) Skizze der Tribüne mit Fokus auf das Mundloch. Sicherheitspersonal (SP) an Position 1 (Experiment 3) ist rot und an Position 2 (Experiment 4) dunkelgrün dargestellt.

Tabelle 5.1: Beschreibung der Tribünenexperimente, MU = Mundloch Unterrang ($\approx 27^\circ$), MO = Mundloch Oberrang ($\approx 35^\circ$). Als Entleerungszeit ist die Zeitspanne des Verlassens der Tribüne über das Mundloch von der ersten bis zur letzten Person angegeben. Die Auswahl des Zeitintervalls zur Bestimmung des ΔN wird in Kapitel 5.3.1.2 beschrieben.

Experiment	Startbedingungen	Gruppen	N	Entleerungszeit / min	ΔN / min
MU1	alle Sitze besetzt	1, 2, 3	293	1:19	228
MU1v2	alle Sitze besetzt und ein Türflügel geschlossen	1, 2, 3	291	2:07	140
MU2	jeder zweite Sitz besetzt	1, 2, 3	214	1:00	212
MU3	alle Sitze besetzt und Ordner an Position 1	1, 2, 3	292	1:28	222
MU4	alle Sitze besetzt und Ordner an Position 2	1, 2, 3	293	1:34	207
MU5	alle Sitze besetzt	1, 2	292	1:44	183
MU5v2	alle Sitze besetzt und ein Türflügel geschlossen	1, 2	292	2:13	129
MU6	jeder zweite Sitz besetzt	1, 2	195	1:19	154
MO1	alle Sitze besetzt	1, 2, 3	291	1:29	198
MO1v2	alle Sitze besetzt und ein Türflügel geschlossen	1, 2, 3	297	2:29	120
MO2	jeder zweite Sitz besetzt	1, 2, 3	199	1:03	193
MO3	alle Sitze besetzt und Ordner an Position 1	1, 2, 3	295	1:34	193
MO4	alle Sitze besetzt und Ordner an Position 2	1, 2, 3	291	1:34	188
MO5	alle Sitze besetzt	1, 2	279	2:06	150
MO5v2	alle Sitze besetzt und ein Türflügel geschlossen	1, 2	297	2:34	111
MO6	jeder zweite Sitz besetzt	1, 2	165	1:09	152

5.3.1.2 Analyse

Für die Analyse der gesamten Experimente auf den Tribünen liegen präzise Trajektorien vor (vgl. Kapitel 3.2). Abbildung 5.3 zeigt eine Detailansicht der Trajektorien aus Experiment MU1v2 im Mundloch mit den genutzten Messlinien (ML) zur Erfassung individueller Durchtrittszeiten $t_{i,ML}$ der Testpersonen N_i . Dadurch kann für jeden Zeitschritt Δt bestimmt werden, wie viele Personen die Messlinie überschritten haben. Aufgrund der Bewegungsrichtung werden die Messlinien ML-vorne, ML-links und ML-rechts als Eintritts-Linien in das Mundloch und ML-hinten als Austritts-Linie bezeichnet. In der weiteren Analyse wird die Summe der Eintritts-Linien als *Eintritt* zusammengefasst.

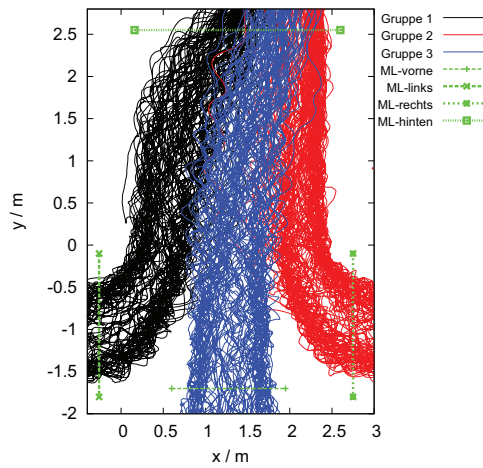


Abbildung 5.3: Detailansicht der Trajektorien (2-dimensional) aus Experiment MU1v2 im Mundloch. Die genutzten Messlinien (ML) sind visualisiert.

Um allgemeingültige Aussagen über den Personenfluss treffen zu können, ist eine Betrachtung des stationären Zustands (vgl. Kapitel 4.2.3.1) notwendig. Abbildung 5.4a zeigt die Durchtrittszeiten der Testpersonen $N_{Austritt}(t)$ im Experiment MU1v2 an der Austritts-Linie. In rot sind die über den gesamten Experimentdurchlauf gemittelten Durchtrittszeiten $N_{Mittelwert}(t)$ für jeden Zeitschritt dargestellt. Ein stationärer Zustand, d. h. ein linearer Anstieg der $N_{Austritt}(t)$ -Funktion mit konstanter Steigung, ist anhand dieser Darstellung nicht eindeutig feststellbar. Es ist sichtbar, dass zu Beginn des Experiments, ca. in den ersten 15 Sekunden, der reale Personenfluss größer ist als der mittlere Fluss. Nach 90 Sekunden scheint die Steigung der $N_{Austritt}(t)$ -Funktion kleiner zu sein als die der $N_{Mittelwert}(t)$ -Funktion, was einem kleineren realen Personenfluss entspricht. Die Darstellung der Differenz von $N_{Austritt}(t)$ und $N_{Mittelwert}(t)$ zu jedem Zeitschritt in Abbildung 5.4b belegt diese Beobachtungen. Eine eindeutige lineare Funktion mit konstanter Steigung in der Zeitspanne von Sekunde 15 bis 90 kann jedoch nicht bestätigt werden. Anhand dieser beiden Diagramme wird deutlich, dass ein eindeutiger stationärer Zustand nicht identifiziert werden kann.

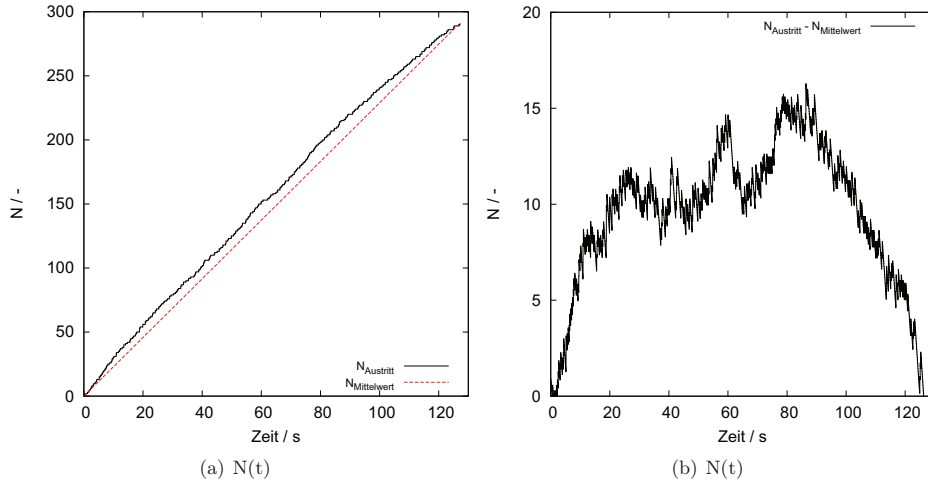


Abbildung 5.4: (a) Gegenüberstellung der realen Durchtrittszeiten mit den mittleren Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie des Experiments MU1v2. (b) Darstellung der Differenz von $N_{\text{Austritt}}(t)$ und $N_{\text{Mittelwert}}(t)$ zu jedem Zeitschritt.

Aufgrund dieser Problematik wurde eine einheitliche Vorgehensweise zur Berechnung der Personenflüsse in den verschiedenen Tribünenexperimenten verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass sich in der Mitte des Experiments ein stationärer Zustand eingestellt hat. Als Zeitintervall $[t_1:t_2]$ werden deshalb die mittleren 60 Sekunden des Experimentdurchlaufs gewählt: $t_1 = t_{\text{gesamt}} / 2 - 30 \text{ s}$ und $t_2 = t_{\text{gesamt}} / 2 + 30 \text{ s}$. Folglich kann der Fluss über $J = \frac{N_{t_2} - N_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta N}{60 \text{ s}}$ berechnet werden. Dadurch werden besondere Einflüsse zu Beginn und gegen Ende des Experiments ausgeschlossen (siehe Abbildung 5.5). Die $N(t)$ -Diagramme aller Tribünenexperimente mit der Darstellung des genutzten Zeitintervalls befinden sich im Anhang A der Arbeit (siehe Abbildung 7.1). Für die Experimente 2 und 6 (reduzierte Startdichte) ist das gewählte Zeitintervall nicht optimal und schließt deutliche Flussänderungen zu Beginn und Ende des Experiments mit ein. Die Wahl eines kleineren Zeitintervalls könnte jedoch zur Folge haben, dass einzelne Flussänderungen im Zeitintervall eine größere Auswirkung auf den berechneten Gesamtfluss nehmen. Diese angesprochenen Flussänderungen treten ebenfalls in der Mitte des Experiments auf (siehe Abbildung 5.4b). Sie sind für den Fußgängerverkehr typisch und müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

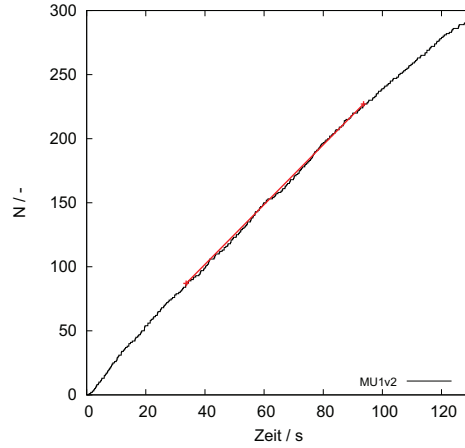


Abbildung 5.5: Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie des Experiments MU1v2. Das Zeitintervall zur Berechnung des effektiven Personenflusses ist mit einer roten Linie dargestellt.

5.3.1.3 Unterschiedliche Tribünenneigung

In Kapitel 5.3.1.1 ist beschrieben, dass die Tribüne der ESPRIT arena in zwei Ränge mit unterschiedlicher Neigung unterteilt ist. Anhand der acht Experimente mit unterschiedlichen Randbedingungen, die jeweils im Unter- und Oberrang durchgeführt wurden, können folgende Verhältnisse der Flusswerte ermittelt werden:

- $J_{MO1} / J_{MU1} = 3,3 \text{ s}^{-1} / 3,8 \text{ s}^{-1} = 0,87$
- $J_{MO1v2} / J_{MU1v2} = 2,0 \text{ s}^{-1} / 2,3 \text{ s}^{-1} = 0,87$
- $J_{MO2} / J_{MU2} = 3,2 \text{ s}^{-1} / 3,5 \text{ s}^{-1} = 0,91$
- $J_{MO3} / J_{MU3} = 3,2 \text{ s}^{-1} / 3,7 \text{ s}^{-1} = 0,86$
- $J_{MO4} / J_{MU4} = 3,1 \text{ s}^{-1} / 3,5 \text{ s}^{-1} = 0,89$
- $J_{MO5} / J_{MU5} = 2,5 \text{ s}^{-1} / 3,1 \text{ s}^{-1} = 0,81$
- $J_{MO5v2} / J_{MU5v2} = 1,9 \text{ s}^{-1} / 2,2 \text{ s}^{-1} = 0,86$
- $J_{MO6} / J_{MU6} = 2,5 \text{ s}^{-1} / 2,6 \text{ s}^{-1} = 0,96$

Basierend auf diesen Flusswerten für die unterschiedlichen Experimente liegt die Spanne der Flussreduktion im steileren Oberrang zwischen 4 % und 19 % (arithmetischer Mittelwert 12 %). In Abbildung 5.6a sind beispielhaft die $N(t)$ -Diagramme der Experimente 1 und 1v2 im Unter- und Oberrang (gemessen an den Austritts-Linien), die diese Unterschiede verdeutlichen, dargestellt. Das Experiment 1v2 belegt, dass die niedrigere Flussrate im Mundloch des Oberrangs

nicht aus einem reduzierten Zustrom resultiert. Abbildung 5.6b zeigt einen Ausschnitt der Durchtrittszeiten im Experiment MO1v2 gemessen an den Eintritts-Linien und der Austritts-Linie. In den ersten 15 Sekunden ist der Zustrom ins Mundloch deutlich größer als der Abstrom, dadurch steigt die Dichte im Mundloch bis auf etwa $2,7 \text{ m}^{-2}$ an (siehe Abbildung 5.8). Da die Dichte im Mundloch zwischen Sekunde 15 und 60 um etwa $2,7 \text{ m}^{-2}$ schwankt, müssen Zu- und Abstrom identisch sein. Folglich muss der Zustrom reduziert werden, was durch einen «Knick» im Diagramm bei Sekunde 15 deutlich wird; anschließend verlaufen beide Funktionen nahezu parallel.

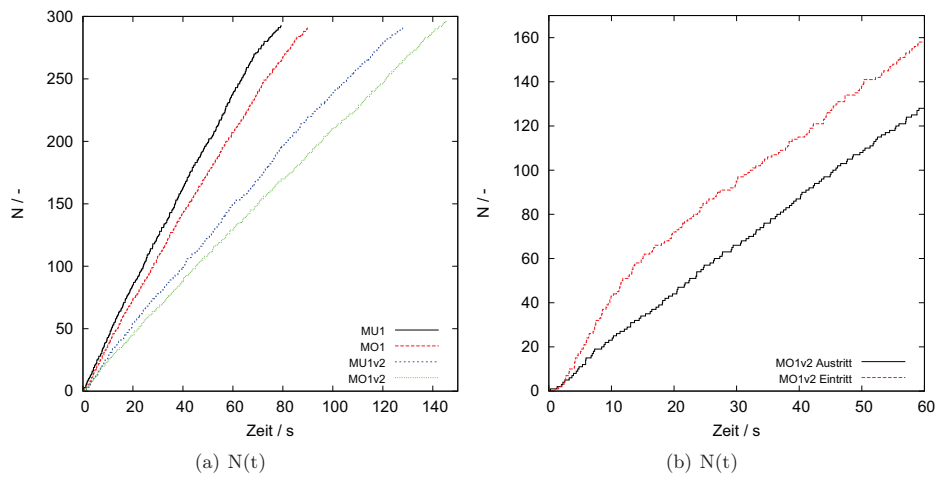


Abbildung 5.6: (a) Durchtrittszeiten an den Austritts-Linien der Experimente 1 und 1v2 im Unter- und Oberrang. (b) Ausschnitt der Durchtrittszeiten im Experiment MO1v2 an den Eintritts-Linien und der Austritts-Linie.

5.3.1.4 Positionierung von Ordnern

Abbildung 5.7c/d zeigt einen Ausschnitt der Trajektorien im Mundloch des Unterrangs mit zwei unterschiedlichen Positionen des Sicherheitspersonals (SP). Es wird deutlich, dass der Ordner (rot) im Experiment MU3 an Position 1 die nutzbare Fläche der Probanden weniger einschränkt als der Ordner (grün) in Experiment MU4 an Position 2 (vgl. die Positionierung mit Abbildung 5.2a/c). Der rote Ordner nutzt den «Totraum» in der Ecke des Geländers, während der grüne Ordner ein Hindernis darstellt und die effektive Breite des Mundlochs reduziert. Die Funktion MU1 (ohne Sicherheitspersonal) verläuft steiler als MU3 und MU4 (siehe Abbildung 5.7a), was einem höheren Personenfluss entspricht. Erstaunlicherweise zeigen die $N(t)$ -Funktionen gemessen an der Austritts-Linie im Oberrang (siehe Abbildung 5.7b) nur geringfügig unterschiedliche Verläufe, obwohl die Trajektorien identisch aussehen. Folgende Verhältnisse der Flusswerte können aufgestellt werden:

- $J_{MO3} / J_{MO1} = 3,2 \text{ s}^{-1} / 3,3 \text{ s}^{-1} = 0,97$

- $J_{MO4} / J_{MO1} = 3,1 \text{ s}^{-1} / 3,3 \text{ s}^{-1} = 0,94$
- $J_{MU3} / J_{MU1} = 3,7 \text{ s}^{-1} / 3,8 \text{ s}^{-1} = 0,97$
- $J_{MU4} / J_{MU1} = 3,5 \text{ s}^{-1} / 3,8 \text{ s}^{-1} = 0,92$

Die Messwerte zeigen, dass der Ordner an Position 1 den Personenfluss im Unter- und Oberang um 3 % reduziert. Eine Positionierung des Sicherheitspersonals direkt im Mundloch an Position 2 verringert den Fluss im Unterrang um 8 % und im Oberrang um 6 %.

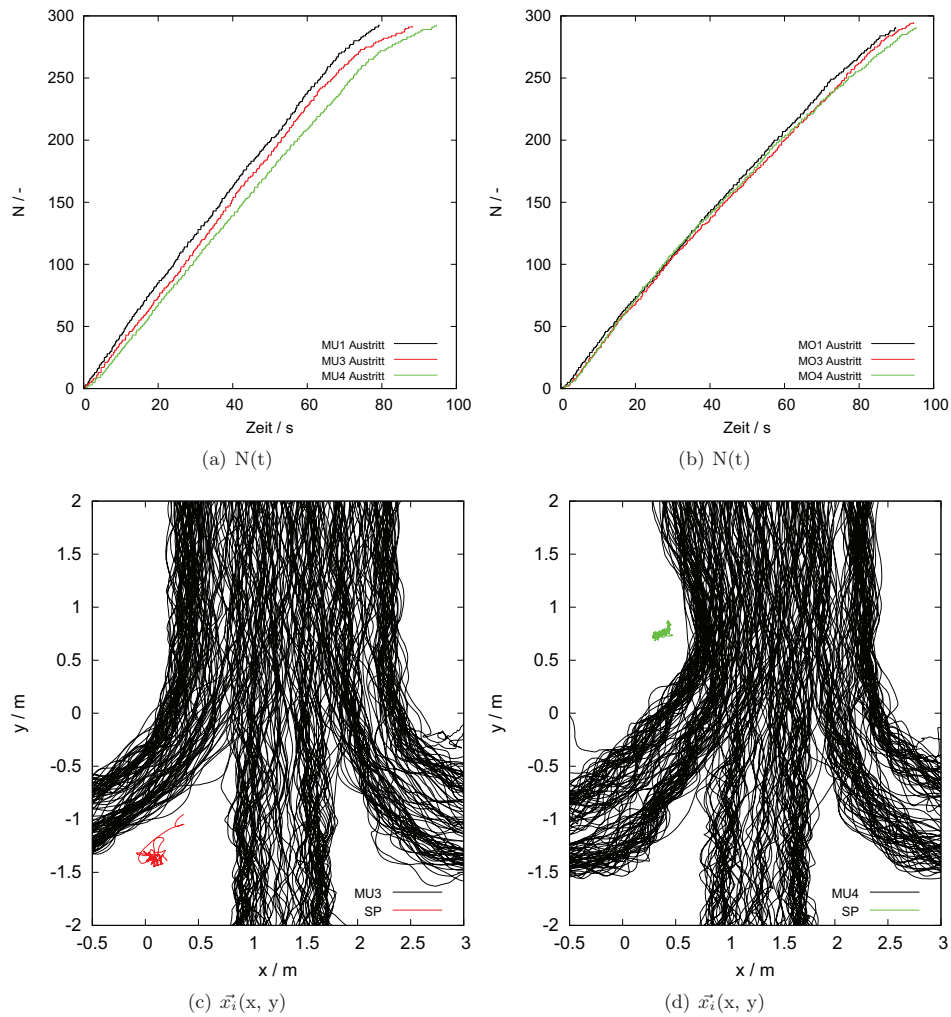


Abbildung 5.7: Vergleich der Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie in den Experimenten 1, 3 und 4 im (a) Unter- und (b) Oberrang. Der Einfluss der Positionierung des Sicherheitspersonals (SP) auf den Bewegungspfad der Probanden ist in (c) und (d) dargestellt.

5.3.1.5 Verhältnis der akkumulierten Breiten der Zuwege zur Ausgangsbreite

Im Experiment 5 werden zwei Personengruppen über zwei 1,2m breite Treppen zum 2,4m breiten Mundloch geführt. Das Verhältnis der akkumulierten Breiten der Zuwege zur Ausgangsbreite des Mundlochs beträgt 1:1. Im Experiment 1 wird eine weitere Personengruppe über eine 1,2m breite Treppe zum Mundloch geleitet. Damit erhöht sich das Verhältnis der Rettungswegbreiten, die zum Mundloch führen, zur Ausgangsbreite auf 1,5:1. Für die resultierenden Flusswerte im Mundloch können folgende Verhältnisse aufgestellt werden:

- $J_{MU5} / J_{MU1} = 3,1 \text{ s}^{-1} / 3,8 \text{ s}^{-1} = 0,82$

- $J_{MO5} / J_{MO1} = 2,5 \text{ s}^{-1} / 3,3 \text{ s}^{-1} = 0,76$

Die gemessenen Flusswerte im Unter- sowie Oberrang belegen, dass zwei zuführende Treppen die Kapazität des Mundlochs nicht erreichen. Durch das Hinzufügen einer dritten Personengruppe konnte der Fluss im Unterrang um 0,7 und im Oberrang um $0,8 \text{ s}^{-1}$ gesteigert werden. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass bei der Berechnung des Personenflusses für Experiment MO5 eine deutliche Flussreduzierung im gewählten Zeitintervall enthalten ist (vgl. Abbildung 7.1f), wodurch das Verhältnis von J_{MO5} zu J_{MO1} kleiner wird. In den Experimenten mit geschlossenem Türflügel (Ausgangsbreite = 1,2m) beträgt das Verhältnis der akkumulierten Breiten der Zuwege zur Ausgangsbreite 2:1 im Experiment 5v2 und 3:1 im Experiment 1v2. Eine signifikante Steigerung des Personenflusses im Mundloch konnte in diesen Experimenten durch das Hinzufügen einer dritten Personengruppe nicht festgestellt werden:

- $J_{MU5v2} / J_{MU1v2} = 2,2 \text{ s}^{-1} / 2,3 \text{ s}^{-1} = 0,96$

- $J_{MO5v2} / J_{MO1v2} = 1,9 \text{ s}^{-1} / 2,0 \text{ s}^{-1} = 0,95$

Im Unter- sowie Oberrang konnte der Fluss nur um $0,1 \text{ s}^{-1}$ gesteigert werden. Die Experimente mit reduzierter Startdichte wurden aufgrund der Unsicherheiten bei der Berechnung eines repräsentativen Personenflusses nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 5.3.1.2).

Angenommen im Experiment 5 beträgt die Anzahl der zwei Personengruppen jeweils 600 Personen, dann muss die Breite jeder Treppe gemäß der MVStättV (vgl. Kapitel 2.3) mindestens 1,2m betragen und das Mundloch ist für 1.200 Personen zu dimensionieren (2,4m). In diesem Fall führt die Auslegung der Rettungswege nach der MVStättV nicht zur optimalen Ausnutzung der Mundlochbreite und somit nicht zur schnellstmöglichen Entleerung der Tribüne.

5.3.1.6 Unterschiedliche Startdichte

In den Experimenten 2 und 6 wurde die Startdichte durch das Besetzen jedes zweiten Sitzplatzes um die Hälfte reduziert. Basierend auf der getroffenen Definition zur Berechnung der Flüsse (siehe Kapitel 5.3.1.2) ergeben sich folgende Verhältnisse:

- $J_{MU2} / J_{MU1} = 3,5 \text{ s}^{-1} / 3,8 \text{ s}^{-1} = 0,92$
- $J_{MU6} / J_{MU5} = 2,6 \text{ s}^{-1} / 3,1 \text{ s}^{-1} = 0,84$
- $J_{MO2} / J_{MO1} = 3,2 \text{ s}^{-1} / 3,3 \text{ s}^{-1} = 0,97$
- $J_{MO6} / J_{MO5} = 2,5 \text{ s}^{-1} / 2,5 \text{ s}^{-1} = 1,00$

Da die Flusswerte mit Unsicherheiten behaftet sind, müssen auch die berechneten Verhältnisse mit Vorsicht betrachtet werden. Eine eindeutige Aussage zur Auswirkung der Startdichte auf den Personenfluss im Mundloch kann nicht getroffen werden. Weitere Untersuchungen sind notwendig.

5.3.1.7 Personendichte im Mundloch

Das Ziel der Experimente mit geschlossenem Türflügel war es, künstlich eine Stausituation im Mundloch hervorzurufen. Die klassische Dichte wurde mit einem Messfeld $A_m = 2,4 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m} = 3,6 \text{ m}^2$ über die gesamte Breite gemessen. Abbildung 5.8 zeigt den zeitlichen Verlauf der klassischen Dichten in den Experimenten MU1v2 und MO1v2. Während des stationären Zustands (Stauphase) schwankt die Dichte um einen Wert von etwa $2,7 \text{ m}^{-2}$. Predtetschenski und Milinski beschreiben in ihrem Handbuch, dass sich im Stau eine maximale Dichte von $9,2 \text{ m}^{-2}$ (mit $f=0,1 \text{ m}^2$) einstellt. In allen durchgeführten Experimenten im HERMES-Projekt wurden keine Dichten größer als 4 m^{-2} gemessen.

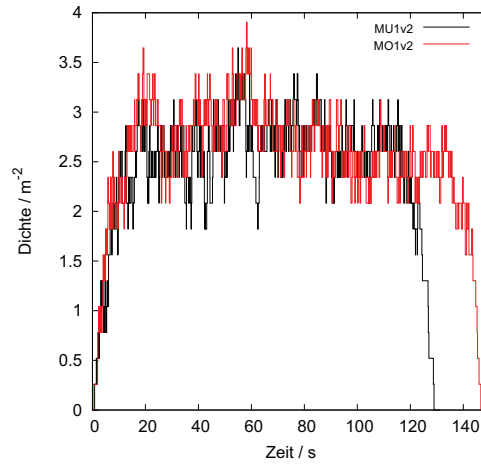


Abbildung 5.8: Zeitlicher Verlauf der Dichten im Mundloch gemessen in den Experimenten MU1v2 und MO1v2.

5.3.2 Feldstudien

Für die Auswertung der Feldstudien wurde der makroskopische Ansatz genutzt (vgl. Kapitel 3.3.1). Durch die Videoaufnahmen kann die unterschiedliche Auslastung der Mundlöcher untersucht und verglichen werden. Im Vordergrund steht die Frage nach dem maximal auftretenden spezifischen Fluss und der maximalen Dichte in Mundlöchern während einer normalen Entleerung. Aufgrund der verschiedenen Messungen kann ebenfalls geprüft werden, ob die Tribünenart (Steh- oder Sitzplatzbereich) Auswirkungen auf die Basisparameter Fluss und Dichte hat. Informationen zu den durchgeführten Feldstudien sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Übersicht der durchgeführten Feldversuche. Ea = ESPRIT arena und BP = BORUSSIA-PARK.

Messung	Datum	Mundloch	Breite in m	Tribüne	N	Zeit in s	ρ_{max} in m^{-2}	$J_{s,max}$ in $(m \cdot s)^{-1}$
Ea 1	13.02.2011	31/32	2,4	Sitzplatz	499	599	2,9	1,08
Ea 2	27.02.2011	31/32	2,4	Sitzplatz	610	599	2,5	1,27
Ea 3	27.02.2011	36/37	2,4	Stehplatz	614	286	4,4	1,23
Ea 4	27.02.2011	38/39	2,4	Stehplatz	877	473	4,0	1,36
BP 1	18.12.2011	16.2	3,0	Stehplatz	965	573	4,0	1,16
BP 2	20.01.2012	16.2	3,0	Stehplatz	421	159	4,3	1,27

5.3.2.1 ESPRIT arena in Düsseldorf

Die Feldstudien in der ESPRIT arena wurden im Unterrang an verschiedenen Mundlöchern von 2,4 m Breite durchgeführt. In Abbildung 5.9 sind die Durchtrittszeiten an der Austritts-Messlinie und der zeitliche Verlauf von Dichte und spezifischem Personenfluss der vier Messungen dargestellt. Die Datensätze Ea 1 und Ea 2 zeigen die Zeitspanne nach Abpfiff des Fußballspiels bis zur nahezu kompletten Entleerung der Tribüne. Ea 3 und Ea 4 stellen den zeitlichen Verlauf der Entleerung nach Absage der «Humba», einem Fanritual⁵, dar. Es kann kein zeitlicher Bezug der Messungen untereinander hergestellt werden.

Abbildung 5.9a zeigt den Entleerungsverlauf der Feldstudie Ea 1. In den ersten 180 Sekunden verlassen knapp 300 Zuschauer relativ zügig die Tribüne über das Mundloch. Diese zielgerichtete Entleerung wird durch das Fanritual, erkennbar an einem Plateau im $N(t)$ -Diagramm, unterbrochen. Anschließend, zwischen Sekunde 300 und 360, verlassen weitere 100 Personen das Mundloch. Ein zweites Fanritual reduziert diesen Personenfluss, bis nach Sekunde 510 die letzten Zuschauer den Block über das Mundloch verlassen. Die Personendichte im Mundloch steigt nur kurzzeitig über $2,0 \text{ m}^{-2}$ an, und der maximal gemessene spezifische Personenfluss liegt bei knapp $1,1 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$.

Der Datensatz Ea 2 basiert auf Messungen desselben Mundlochs (31/32), jedoch an einem anderen Spieltag (siehe Abbildung 5.9b). Es sind zwei Hauptentleerungsphasen zu erkennen, die erste von Sekunde 130 bis 280 und die zweite von Sekunde 490 bis 610. Das Plateau im $N(t)$ -Diagramm ist nicht durch das gemeinsame Feiern von Fans und Mannschaft zu erklären. Darauf wurde wegen eines zu Spielbeginn explodierenden Knallkörpers vor der Düsseldorfer Fankurve, wobei mehrere Medienvertreter verletzt wurden, verzichtet. Ähnlich wie in Ea 1 erreicht die Personendichte nur kurzzeitig Werte über $2,0 \text{ m}^{-2}$, und der maximal spezifische Fluss liegt ebenfalls bei knapp $1,1 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ (Einzelwert bei $1,27 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$).

In den Datensätzen Ea 3 und Ea 4, welche sich beide auf den Stehplatzbereich beziehen, ist nur die Entleerungsphase nach Absage der «Humba» dargestellt. Beide Mundlöcher weisen einen stetigen Fluss ohne Unterbrechungen (Plateau) auf. In Ea 4 wird deutlich, dass der Personenfluss mit der Dauer der Entleerungsphase kontinuierlich abnimmt. Die Personendichte überschreitet teilweise $4,0 \text{ m}^{-2}$, und der maximale spezifische Fluss liegt bei ca. $1,2 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ (Einzelwert bei $1,38 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$).

⁵Die Fußballmannschaft stimmt ein Lied an und die Fans singen mit. Es wird gemeinsam gefeiert.

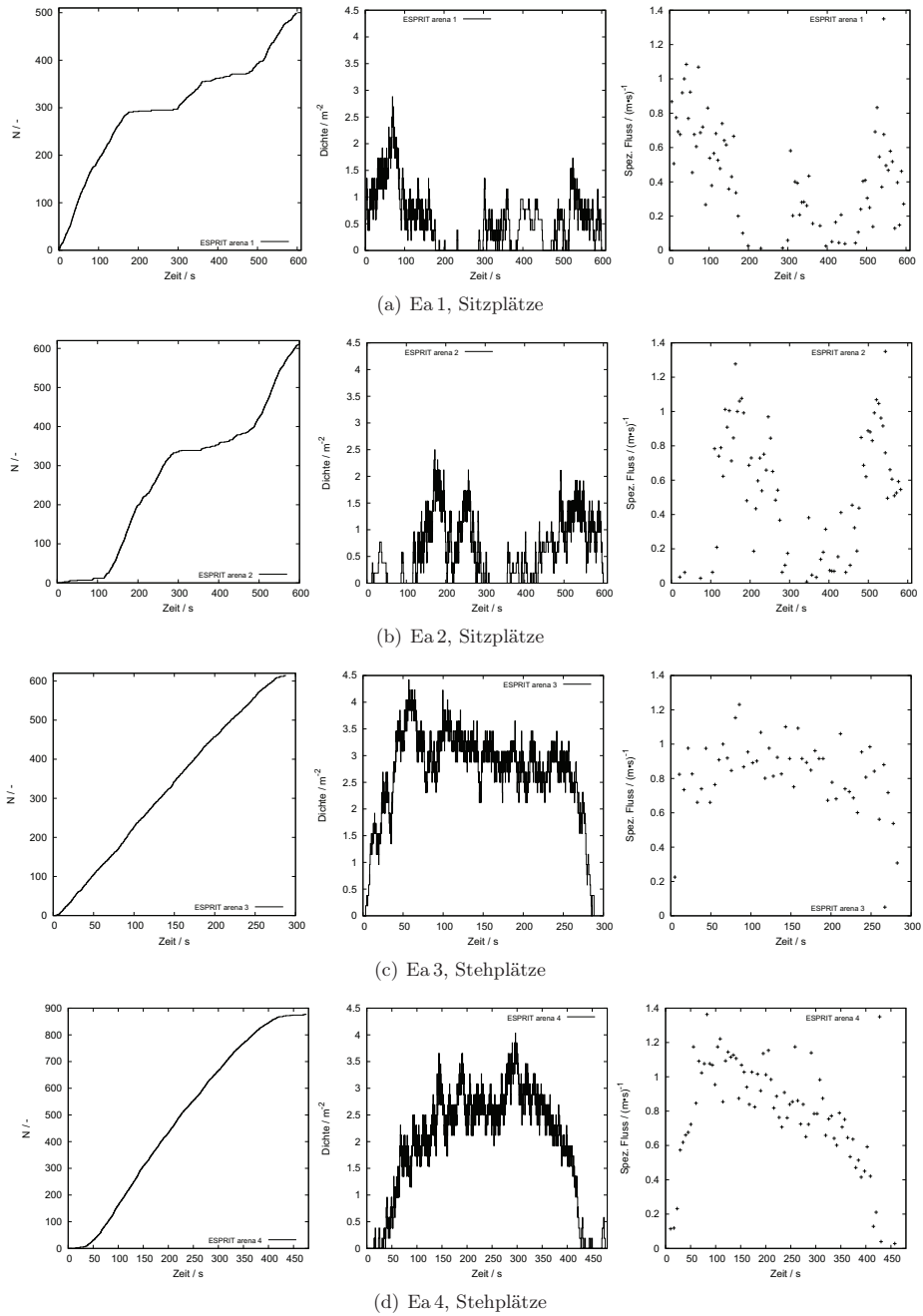


Abbildung 5.9: Durchtrittszeiten und zeitlicher Verlauf der Dichte sowie des spezifischen Flusses während der Feldversuche in der ESPRIT arena. (a) und (b) zeigen Messwerte im Sitzplatz- und (c) und (d) im Stehplatzbereich.

5.3.2.2 BORUSSIA-PARK in Mönchengladbach

Die Tribüne des BORUSSIA-PARKs ist ebenfalls in zwei Ränge aufgeteilt, den Unter- und Oberrang. Jeder Rang unterteilt sich weiter in zwei Bereiche mit unterschiedlicher Neigung: Unterrang in 22° und 28° , Oberrang in 26° und 32° . Beide Feldstudien wurden am 3,0 m breiten Mundloch 16.2 im Unterrang der Nordtribüne durchgeführt. Der Datensatz BP 1 zeigt die komplette Zeitspanne von Abpfiff bis nahezu vollständiger Entleerung des Blocks. In BP 2 erfolgte eine Beschränkung auf den Zeitbereich, in dem das Mundloch stark frequentiert wurde. Ein zeitlicher Bezug der beiden Messungen untereinander kann nicht hergestellt werden.

Das $N(t)$ -Diagramm in Abbildung 5.10a zeigt, wie sich nach Abpfiff des Fußballspiels schnell ein Personenfluss im Mundloch bis Sekunde 100 aufbaut. Zwischen Sekunde 100 und 300 flacht die Funktion ab, was mit einem niedrigeren Fluss verbunden ist. Der Großteil der Zuschauer verlässt nach Sekunde 300 den Block über das Mundloch. Während dieser Entleerungsphase tritt ein maximaler spezifischer Fluss von $1,16 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$ und eine maximale Dichte von $4,0 \text{ m}^{-2}$ auf.

Der Datensatz BP 2 zeigt einen kontinuierlichen Personenfluss über 160 s. Kurzzeitig werden im Mundloch Personendichten größer als $4,0 \text{ m}^{-2}$ gemessen, und der spezifische Personenfluss erreicht einen maximalen Wert von $1,27 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$.

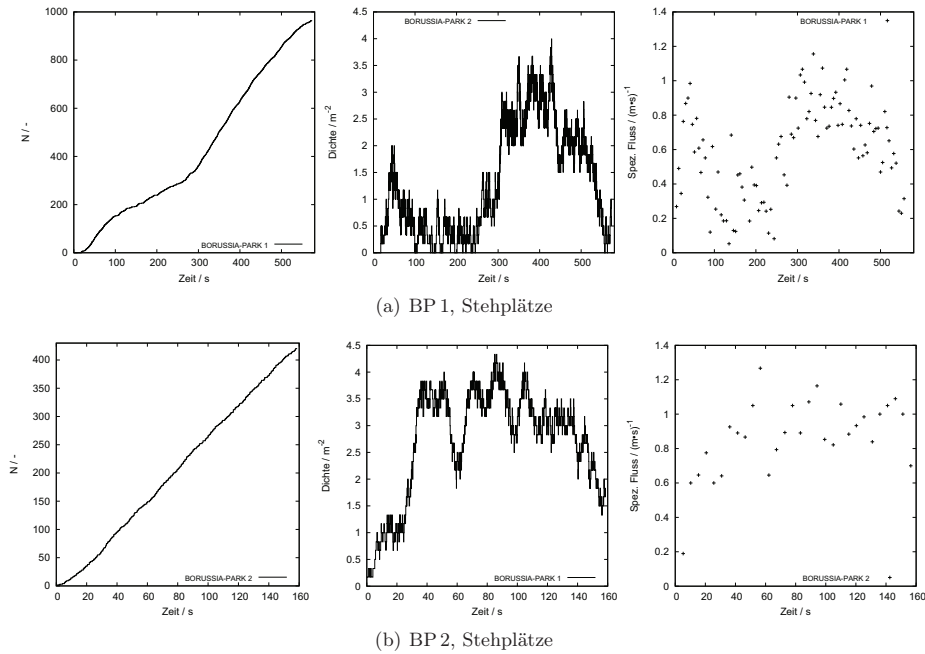


Abbildung 5.10: Durchtrittszeiten und zeitlicher Verlauf der Dichte sowie des spezifischen Flusses während der Feldversuche im BORUSSIA-PARK. (a) und (b) zeigen Messwerte im Stehplatzbereich.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel sind drei unterschiedliche Personenführungen in deutschen Stadien vorgestellt und in Bezug auf die maximale Weglänge vom weitest entfernten Sitzplatz zum Ausgang sowie dem Verkehrsflächenbedarf bewertet worden. Anhand von verschiedenen experimentellen Untersuchungen wurde der Fußgängerverkehr auf Tribünen analysiert und die Auswirkung unterschiedlicher Einflussgrößen quantifiziert.

Der Vergleich der Experimente im Unter- und Oberrang zeigt zum Teil überraschende Ergebnisse. Es wird deutlich, dass sich die Neigung der Tribüne auf den Personenfluss im Mundloch auswirkt; über alle Experimente gemittelt ist der Fluss im Oberrang 12% niedriger als im Unterrang. Im Experiment 1, welches die Situation nach einem Fußballspiel oder einer anderen Veranstaltung in der ESPRIT arena widerspiegelt, kann im Unterrang alle zwei Sekunden eine Person mehr das Mundloch verlassen als im Oberrang. Auch in Experiment 1v2, bei dem ausgeschlossen werden kann, dass der geringere Zustrom über die drei Treppen der flussreduzierende Faktor ist, konnte festgestellt werden, dass der Personenfluss im Unterrang höher ist als im Oberrang. Psychologische Einflüsse scheinen der Grund zu sein. Die Zuschauer gehen auf der steileren Treppe vorsichtiger und langsamer, das zeigt das Fundamentaldiagramm der

Tribünentreppen (siehe Abbildung 4.11), und behalten diese niedrigere Geschwindigkeit auch für den horizontalen Bereich im Mundloch bei. Die Positionierung von Ordnern hat eine geringere Auswirkung auf den Personenfluss als die Tribünenneigung. Im Unter- sowie Oberrang reduziert ein Ordner an Position 1 den Fluss lediglich um 3 %. Eine Positionierung des Sicherheitspersonals direkt im Mundloch an Position 2 schränkt den Fluss im Unterrang um 8 % und im Oberrang um 6 % ein. Eine eindeutige Aussage bezüglich der Auswirkung der Startdichte auf den Personenfluss im Mundloch kann basierend auf den durchgeführten Experimenten nicht getroffen werden. In der Stauphase schwankt die Personendichte im Mundloch des Unter- sowie Oberranges um ca. $2,7 \text{ m}^{-2}$.

Die MVStättV gibt eine minimale Breite von Rettungswegen in Abhängigkeit der darauf angewiesenen Personenzahl vor und unterscheidet bezüglich der Kapazität eines Rettungsweges nicht zwischen einer Treppe oder einem horizontalen Korridor (siehe Kapitel 2.3). Im Experiment 5 beträgt das Verhältnis der akkumulierten Breiten der zuführenden Treppen zur Ausgangsbreite 1:1, wie es sich aus den Anforderungen der MVStättV ergeben kann, und führt nicht zur optimalen Ausnutzung der Mundlochbreite. Durch eine Erhöhung dieses Verhältnisses auf 1,5:1 (Experiment 1) konnte der Fluss im Mundloch signifikant gesteigert werden; im Unterrang um 0,7 (23 %) und im Oberrang um $0,8 \text{ s}^{-1}$ (32 %). In dem Block, den wir für unsere Experimente unter Laborbedingungen genutzt haben, beträgt die maximale Anzahl von Zuschauern während einer Veranstaltung $N_{\max} = 946$. Unter der Annahme, dass der Personenfluss während der gesamten Entleerungsphase konstant ist, führen die gemessenen Flusswerte im Unterrang zu folgenden Entleerungszeiten:

- $t_{\text{Evak}, \text{MU}5} = 5:05$ Minuten
- $t_{\text{Evak}, \text{MU}1} = 4:08$ Minuten.

Durch das Hinzufügen einer weiteren Personengruppe über eine dritte 1,2 m breite Treppe konnte der Personenfluss im Mundloch erhöht werden, was zu einer Reduzierung der Entleerungszeit eines gesamten Blockes von knapp einer Minute führen würde. Folglich ist der Ansatz der MVStättV, Treppen und Flure als Rettungsweg gleichzusetzen, nicht sinnvoll. Die entsprechenden Fundamentaldiagramme für eine Treppe und einen Korridor (siehe Abbildung 4.11b und 6.5) belegen, dass die Kapazität einer Treppe abwärts ($J_{s, \max} \approx 1,4 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$) niedriger ist als die eines Korridors ($J_{s, \max} \approx 2,2 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$).

Aufgrund der gleichen Geometrie ist ein direkter Vergleich von Flusswerten der Feldstudien Ea 1 und Ea 2 (Unterrang und Sitzplatzbereich) mit dem Experiment MU1 möglich. Während des stationären Zustandes beträgt der effektive Fluss im Experiment MU1 $3,8 \text{ s}^{-1}$. In den Feldstudien liegen einzelne Maxima mit $2,6$ und $3,0 \text{ s}^{-1}$ unter den Flusswerten der Laborexperimente. Die Betrachtung des Personenflusses über die gesamte Dauer der Feldstudien zeigt, dass diese Maximalwerte nicht über einen längeren Zeitraum aufrecht erhalten werden können. Diese Aussage gilt ebenfalls für alle anderen Feldstudien im Stehplatzbereich.

Die Feldstudien in der ESPRIT arena ermöglichen auch eine direkte Gegenüberstellung der Messwerte des Sitz- und Stehplatzbereichs. Bezogen auf den spezifischen Personenfluss sind die Unterschiede relativ gering. Während im Sitzplatzbereich ein spezifischer Fluss von etwa $1,1 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ die obere Grenze darstellt, liegt diese Grenze im Stehplatzbereich bei ca. $1,2 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$. Die auftretenden Personendichten im Mundloch sind im Stehplatzbereich signifikant höher. Im Sitzplatzbereich liegt die maximale Dichte bei $2,9 \text{m}^{-2}$, im Stehplatzbereich bei bis zu $4,4 \text{m}^{-2}$. Obwohl die Mundlochbreite sowie die Personenführung im Stehplatzbereich des BORUSSIA-PARKs unterschiedlich ist, wurden vergleichbare maximale Fluss- sowie Dichtewerte im Mundloch ermittelt wie im Stehplatzbereich der ESPRIT arena. Grund für die höhere Personendichte im Mundloch scheinen psychologischer Art zu sein, ähnlich dem reduzierten Personenfluss im Oberrang. Durch die höhere Personendichte im Stehplatzbereich während des Fußballspiels kann vermutet werden, dass sich die Zuschauer an das Gedränge gewöhnt haben und deshalb beim Verlassen der Tribüne diese hohen Dichten nicht scheuen.

Kapitel 6

Validierung von Computersimulationen

Für die Abschätzung von Räumungszeiten in Brandschutzgutachten werden sowohl Handrechenverfahren als auch Computersimulationen genutzt, wobei letztere immer mehr in den Vordergrund rücken. Das Angebot an verschiedener Simulationssoftware umfasst kommerzielle und Open-Source-Programme¹, wie beispielsweise buildingEXODUS, Simulex, Pathfinder, Fire Dynamics Simulator with Evacuation, Aseri, PedGo etc. Bei der Anwendung derartiger Simulationsprogramme ist zu beachten, dass ein Modell nur so gut sein kann, wie die Daten, auf denen es basiert. Folglich sollte die Validierung der Software einen hohen Stellenwert einnehmen.

Oft beschränkt sich die Validierung jedoch auf einen Vergleich realer mit simulierten Gesamträumungszeiten. Diese Vorgehensweise liefert nur einen groben Überblick, denn es wird nicht berücksichtigt, ob beispielsweise Staubereiche innerhalb eines Szenarios richtig reproduziert werden. Wichtig ist die Prüfung, ob in jedem Anlagenteil (Treppe, Tür, Flur etc.) die Dynamik von Fußgängern richtig dargestellt wird. Rogsch [19, 58, 59] hat verschiedene Simulationsprogramme und das Handrechenverfahren nach PM miteinander verglichen und herausgefunden, dass sich für einfache Geometrien signifikant unterschiedliche Räumungszeiten ergeben. Diese Unterschiede können sich bei einer komplexeren Geometrie aufsummieren oder ausgleichen.

Die Tribüne in der ESPRIT arena ist eine komplexe Geometrie, die sich aus einer Kombination von Korridoren, Treppen, Ecken und Kreuzungen zusammensetzt. Um die angesprochenen Ausgleichseffekte bei der Simulation der Tribüne ausschließen oder zumindest bei der Interpretation der Simulationsergebnisse berücksichtigen zu können, werden zunächst die einfachen Geometrien separat mit experimentellen Daten verglichen. Im nächsten Schritt folgen Analysen von Simulationen der Tribünenexperimente mit zwei Personenströmen (MU5/MO5), mit drei Personenströmen (MU1/MO1) und dem Experiment mit geschlossenem Türflügel (MU1v2/MO1v2). Anhand von Durchtrittszeiten an verschiedenen Messlinien (siehe Abbildung 5.3) und der Dichte im Mundloch (vgl. Kapitel 5.3.1.7) findet eine Prüfung statt, inwieweit FDS+Evac in der

¹Der Quelltext ist öffentlich zugänglich.

Lage ist, diese Szenarioänderungen realitätsnah zu reproduzieren. In der Simulation des Experiments 5 wird die Gesamträumungszeit maßgeblich durch die richtige Berechnung des Personenflusses auf den Treppen beeinflusst. Durch das Hinzufügen einer dritten Personengruppe im Experiment 1 steigt die Dichte im Mundloch und die Wechselwirkungen zwischen den Agenten gewinnen an Bedeutung. Im Experiment 1v2 wird durch das Reduzieren der Ausgangsbreite ein Stau im Mundloch erzeugt. Hier stellt sich die Frage, ob und zu welchem Zeitpunkt in der Simulation dieser Stau auftritt.

6.1 Übersicht zu FDS+Evac

Der Fire Dynamics Simulator², in der aktuellen Version 5.5.3, ist ein international weit verbreitetes Open-Source-Programm zur Berechnung von brandinduzierten Strömungen. Seit der FDS-Version 5.5 ist ein Evakuierungsmodul (Evac)³, aktuelle Version 2.2.1, implementiert, welches eine Kombination von Brand- und Evakuierungssimulationen ermöglicht. Die Visualisierung der Berechnungen erfolgt mit Smokeview in der aktuellen Version 5.6.

Laut *Technical Reference and User's Guide* [9] ist FDS+Evac vorrangig ein Forschungstool, um Evakuierungsprozesse zu untersuchen. Aufgrund der unzureichenden Validierung wird empfohlen, dass es nur zusammen mit anderen «vollständig validierten» Evakuierungsmodellen verwendet wird. Hier stellt sich die Frage, was bedeutet «vollständig validiert» und welches Modell ist das? Die Validierung von FDS+Evac erfolgte hauptsächlich anhand dreier Testszenarien, bei denen Simulationsergebnisse mit experimentellen Daten verglichen werden. Es wurde das Fundamentaldiagramm für einen Korridor verglichen, die Räumung eines Bürogebäudes mit Fokus auf einen Treppenraum und die Räumung einer öffentlichen Bibliothek. Des Weiteren werden Vergleiche mit anderen Simulationsprogrammen präsentiert, jedoch fehlt in den Szenarien ein Referenzwert in Form experimenteller Daten. Eine detaillierte Untersuchung, ob beispielsweise Personendichten und Staubereiche realitätsnah reproduziert werden, steht noch aus. Für weitere Informationen zur Validierung siehe [9, 60].

FDS+Evac basiert auf einem mikroskopischen Modell, welches jede Person – auch «Agent» genannt – als eigenständiges Individuum mit unterschiedlichen persönlichen Eigenschaften und Räumungsstrategien betrachtet. Das Evakuierungsmodul hat eine stochastische Komponente, welches anhand von Zufallszahlen die Startpositionen und Eigenschaften von Agenten in jeder Simulation neu verteilt; bspw. entsprechend einer Normal- oder Gleichverteilung. Diese Komponente nimmt, in Form einer auf die Agenten wirkenden Zufallskraft, Einfluss auf das Bewegungsmodell (siehe Kapitel 6.1.1). Folglich ist es sinnvoll, mehrere Simulationen durchzuführen, um eine Spannweite resultierender Räumungszeiten abschätzen zu können (siehe Abbildung 6.16). In den durchgeführten Simulationen gibt es nur einen Ausgang, sodass die

²<http://fire.nist.gov/fds/>

³<http://www.vtt.fi/fdsevac/>

Routenwahl in diesen Szenarien ausgeklammert werden kann, welche einen entscheidenden Einfluss auf die Spanne der Räumungszeit nehmen kann.

In FDS+Evac muss für die Evakuierungs- sowie Brandsimulation ein eigenes Gitter angelegt werden. Mit diesem zweidimensionalen Evakuierungsgitter wird die Geometrie des Szenarios in Zellen unterteilt. Die Diskretisierung bezieht sich jedoch nur auf die Geometrie, der Basisalgorithmus (Social Force Model) zur Beschreibung der Bewegung aller Agenten ist räumlich kontinuierlich. Vorgegeben wird die Bewegungsrichtung der Agenten durch ein sogenanntes Flussprofil, welches über den Fluss-Löser von FDS ermittelt wird. Der Ausgang agiert als ein Ventilator, der ein inkompressibles Fluid mit niedriger Geschwindigkeit aus dem Raum befördert. Aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit und einer empfohlenen Zellgröße von ca. 0,25 m Kantenlänge werden Turbulenzen vermieden, und es entsteht ein eindeutiges Flussprofil in Richtung der Tür (siehe Abbildung 6.15). Laut Handbuch ist diese Route nicht zwangsläufig die kürzeste, aber meistens nicht signifikant länger.

6.1.1 Bewegungsmodell der Agenten

Das Bewegungsmodell von FDS+Evac basiert auf dem «Social Force Model». Über abstoßende (soziale) Kräfte werden sinnvolle Abstände zu Wänden als auch zu anderen Agenten eingehalten. Jeder Agent besitzt eine eigene treibende Kraft, kombiniert mit einer kleinen fluktuierenden Zufallskraft, die ihn zum Ausgang führt. Im Folgenden wird das angewandte Modell in FDS+Evac kurz vorgestellt. Für eine detaillierte Beschreibung zum Social Force Model sei auf [61–64] verwiesen.

Ausgehend vom Social Force Model von Helbing wird der Platzbedarf einer Person durch einen Kreis beschrieben. In FDS+Evac erfolgte eine Modifikation des Modells durch Langston [65] und Korhonen [66–69], wodurch der Platzbedarf von Agenten nun mittels drei überlappender Kreise bestimmt wird, welche die Form einer Ellipse annähern (siehe Abbildung 6.1). In Tabelle 6.1 sind die unterschiedlich genutzten Radien der fünf vordefinierten Personengruppen und deren freie Gehgeschwindigkeiten zusammengefasst. Die Bewegung jedes Agenten wird anhand der Bewegungsgleichung beschrieben:

$$m_i \frac{d^2 \vec{x}_i(t)}{dt^2} = \vec{f}_i(t) + \vec{\xi}_i(t), \quad (6.1)$$

dabei ist $\vec{x}_i(t)$ die Position von Agent i zum Zeitpunkt t , $\vec{f}_i(t)$ ist die sich aus dem Umfeld ergebende Kraft auf Agent i , m_i ist die Masse und $\vec{\xi}_i(t)$ beschreibt eine niedrige fluktuierende zufällige Kraft. Die Geschwindigkeit von Agent i ist gegeben durch $\vec{v}_i(t) = d\vec{x}_i / dt$.

Die auf Agent i wirkende Kraft setzt sich wie folgt zusammen:

$$\vec{f}_i = \frac{m_i}{\tau_i} (\vec{v}_i^0 - \vec{v}_i) + \sum_{j \neq i} \vec{f}_{ij} + \sum_w \vec{f}_{iw} + \sum_k \vec{f}_{ik}. \quad (6.2)$$

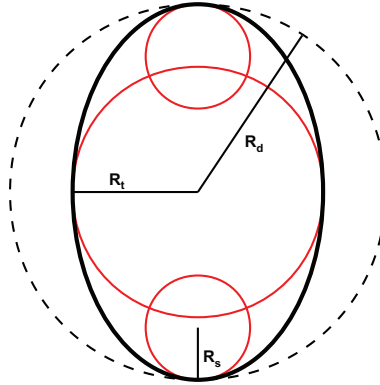


Abbildung 6.1: Geometrische Darstellung eines Agenten mit drei roten überlappenden Kreisen, die eine Ellipse annähern in FDS+Evac [9].

Der erste Term beschreibt die Bewegungskraft des zu evakuierenden Agenten mit der eigenen spezifischen Gehgeschwindigkeit $v_i^0 = |\vec{v}_i^0|$; die Bewegungsrichtung zum Ausgang wird vorgegeben durch die Richtung von \vec{v}_i^0 . Der Trägheitsparameter τ_i nimmt Einfluss auf die Beschleunigung der Gehgeschwindigkeit bis zur bevorzugten freien Gehgeschwindigkeit. Agent-Agent Wechselwirkungen f_{ij} werden in der ersten Summe beschrieben, die Summe über w beschreibt die Agent-Wand-Beziehung f_{iw} und die letzte Summe kann genutzt werden, um weitere Agent-Umgebung-Wirkungen f_{ik} zu beschreiben (bspw. die Reaktion auf einen Brand bzw. die dabei entstehenden Rauchgase).

Da in diesem Kapitel der Fokus auf die Validierung und nicht auf die Grundlagen des Modells gelegt wird, sei für die detaillierte Beschreibung und Berechnung der einzelnen Kräfte auf [61–69] verwiesen.

Tabelle 6.1: Übersicht der fünf vordefinierten Personengruppen in FDS+Evac mit deren jeweiligen Platzbedarf und freien Gehgeschwindigkeit aus [9].

Personen- gruppe	R_d in m	R_t/R_d	R_s/R_d	d_s/R_d	Geschwindigkeit in m/s
Erwachsene	$0,255 \pm 0,035$	0,5882	0,3725	0,6275	$1,25 \pm 0,30$
Männer	$0,270 \pm 0,020$	0,5926	0,3704	0,6296	$1,35 \pm 0,20$
Frauen	$0,240 \pm 0,020$	0,5833	0,3750	0,6250	$1,15 \pm 0,20$
Kinder	$0,210 \pm 0,015$	0,5714	0,3333	0,6667	$0,90 \pm 0,30$
Senioren	$0,250 \pm 0,020$	0,6000	0,3600	0,6400	$0,80 \pm 0,30$

6.1.2 Einstellungen

Für die Simulationen wurden grundsätzlich die Standardeinstellungen von FDS+Evac verwendet. Eine Ausnahme stellt die freie horizontale Gehgeschwindigkeit dar. Aus den Ergebnissen des Forschungsprojektes HERMES ist bekannt, dass die Mehrheit der Probanden eine freie Gehgeschwindigkeit von ca. 1,50 m/s aufwies. Damit liegt die Geschwindigkeit über der Voreinstellung von FDS+Evac mit 1,25 m/s für Erwachsene (vgl. Tabelle 6.1). Um Abweichungen der Simulationen von den Experimenten aufgrund der Geschwindigkeitsdifferenz zu vermeiden, wurde die freie Gehgeschwindigkeit in allen Simulationen auf 1,50 m/s gesetzt. Folgende Einstellungen sind genutzt worden:

```
&PERS ID = 'ADULT',
  DEFAULT_PROPERTIES = 'ADULT',
  VELOCITY_DIST = 4, VEL_MEAN = 1.50,
  VEL_PARA = 0.30,
  PRE_EVAC_DIST = 0, PRE_MEAN = 0,
  DET_EVAC_DIST = 0, DET_MEAN = 0,
  DENS_INIT = 4.0 /

&EVAC ID = 'Unterrang links, Sitzreihe 1',
  NUMBER_INITIAL_PERSONS = 16,
  XB = -8.6, 0.6, -1.4, -2.0, 0.0, 2.0,
  AVATAR_COLOR = 'BLUE',
  KNOWN_DOOR_NAMES = 'EXIT',
  KNOWN_DOOR_PROBS = 1.0,
  ANGLE = 270,
  PERS_ID = 'ADULT' /

&EVSS ID = 'Treppe',
  FAC_V0_UP = 0.65,
  FAC_V0_DOWN = 0.7,
  FAC_V0_HORI = 1.0 /
```

Über den Gruppenparameter «PERS» können Eigenschaften der eingebrachten Agenten vergeben werden. Als Grundeinstellung wurde die Personengruppe «ADULT» gewählt, wodurch der persönliche Platzbedarf und die freie Gehgeschwindigkeit vordefiniert sind (vgl. Tabelle 6.1). Mit weiteren spezifischen Befehlen können die Grundeinstellungen ergänzt bzw. verändert werden. «VELOCITY_DIST = 4» gibt an, dass die Geschwindigkeiten normalverteilt werden. Die mittlere freie Gehgeschwindigkeit von 1,50 m/s wird über den Befehl «VEL_MEAN = 1.50» mit einer Standardabweichung von 0,30 m/s gemäß «VEL_PARA = 0.30» definiert. Reaktionszeiten und (Brand-)Erkennungszeiten werden mit den Befehlen «PRE_EVAC_DIST = 0» und «DET_EVAC_DIST = 0» gleichverteilt und auf null gesetzt («PRE_MEAN = 0» und «DET_MEAN = 0» entsprechend). Über den Befehl «DENS_INIT = 4.0⁴» wird FDS+Evac vorgegeben, dass bei der zufälligen Verteilung von Personen im Raum eine maximale Dichte von vier Personen pro Quadratmeter akzeptiert wird.

⁴In FDS+Evac ist $4,0 \text{ m}^{-2}$ die maximal mögliche Personendichte.

Der Gruppenparameter «EVAC» wird genutzt, um Bereiche in Form von Rechtecken «XB = x1, x2, y1, y2, z1, z2» (die z-Komponente bleibt unberücksichtigt) zu definieren, in denen eine bestimmte Anzahl von Agenten «NUMBER_INITIAL_PERSONS = 16» zufällig verteilt wird. Diese Bereiche werden in Smokeview mit schwarzen Rahmen dargestellt (siehe Abbildung 6.15). Über den Befehl «AVATAR_COLOR = 'BLUE'» können den Agenten verschiedene Farben zugewiesen werden. Da der Algorithmus der Routenwahl in FDS+Evac noch nicht ausgereift ist (vgl. [9]), ist es empfehlenswert, den Agenten einen eindeutigen Ausgang zuzuweisen. In diesem Fall werden alle Personen das Szenario über den Ausgang «EXIT» («KNOWN_DOOR_NAMES = 'EXIT'») mit einer Wahrscheinlichkeit von 100 % («KNOWN_DOOR_PROBS = 1.0») verlassen. «ANGLE = 270» gibt die Blickrichtung der Agenten bei der Positionierung an. Da in der Tribüne die Probanden zu Beginn des Experiments auf ihren Plätzen sitzen, ist ihr Blickwinkel in Richtung des Fußballplatzes gerichtet. Diese Ausrichtung wird ebenfalls in den durchgeführten Simulationen berücksichtigt.

Treppen können in FDS+Evac mit dem Gruppenparameter «EVSS» dargestellt werden. Da es sich um ein zweidimensionales Modell handelt, wird die Bewegung auf einer Treppe durch eine reduzierte Gehgeschwindigkeit simuliert; die freie horizontale Geschwindigkeit v_i^0 wird mit einem Faktor («FAC_V0_UP = 0.65» bzw. «FAC_V0_DOWN = 0.70») multipliziert.

6.2 Simulation und Vergleich einfacher Geometrien

In diesem Kapitel werden Simulationen von einfachen Geometrien (Korridor, T-Kreuzung, Ecke) mit Experimenten unter Laborbedingungen verglichen. Für jede Simulation speichert FDS+Evac die Trajektorien aller Agenten in einer Binärdatei.

Basierend auf den Trajektorien können die Basisparameter auf mikroskopischer Ebene berechnet und den experimentellen Daten in Form eines Fundamentaldiagramms gegenübergestellt werden. Abbildung 6.2 zeigt beispielhaft das Fundamentaldiagramm für einen Korridor, welches anhand von fünf Simulationen mit FDS+Evac ermittelt wurde. Von Simulation #1 zu #2 wurde der Zustrom über einen Eingang erhöht (bis zum Maximum des Eingangs). Um die Zuführung von Personen und damit die Dichte im Korridor weiter zu steigern, wurden in den Simulationen #3 bis #5 zwei weitere Eingänge an den Seitenwänden ergänzt. Messwerte im Bereich von 2 m^{-2} konnten in Simulation #4 nur durch eine Startdichte im Korridor von ca. 4 m^{-2} erzeugt werden. Durch die Reduzierung der Ausgangsbreite auf 1,8 m in Simulation #5 ist ein Stau forciert und Personendichten um 3 m^{-2} erreicht worden. Bei der Auswertung wird nur der stationäre Zustand betrachtet, deshalb sind im Fundamentaldiagramm keine Messwerte aus der Simulation #4 bei Dichten von 4 m^{-2} (Startdichte) enthalten; das System hat sich bei ca. 2 m^{-2} eingestellt.

Von der Auswertung des Experiments «Treppe abwärts» ist bekannt, dass sich die Struktur der Kartendarstellung mit der Auslastung der Anlage (effektiver Personenfluss) ändert (vgl.

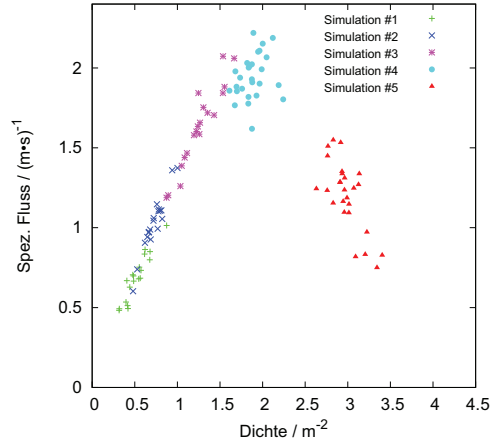


Abbildung 6.2: Fundamentaldiagramm für einen Korridor basierend auf Messwerten aus fünf Simulationen mit FDS+Evac.

Kapitel 4.2.3.3). Aus diesem Grund wurde der Zustrom in der Simulation für die folgenden drei Szenarien so gewählt, dass der Fluss im Szenario bestmöglich mit dem Vergleichsexperiment übereinstimmt. Die folgenden Kartendarstellungen sollen nicht dazu dienen, Mittelwerte der Basisgrößen miteinander zu vergleichen; im Fokus steht die räumliche Nutzung.

Alle in diesem Kapitel dargestellten Karten, die Kantenlängen der Zellen betragen einheitlich $\Delta x = \Delta y = 0,1$ m, zeigen Mittelwerte der Kenngrößen über den stationären Zustand.

6.2.1 Korridor

Bei diesem Experiment handelt es sich um einen unidirektionalen Personenstrom in einem 3,0 m breiten Korridor. In verschiedenen Durchläufen wurde die Anzahl der Personen sowie die Breite variiert. Für eine detaillierte Beschreibung und Analyse der Experimente unter Laborbedingungen, die hier als Vergleichswerte genutzt werden, wird auf [4] verwiesen.

6.2.1.1 Trajektorien

In Abbildung 6.3 werden die extrahierten Trajektorien aus FDS+Evac denen eines Experiments unter Laborbedingungen grafisch gegenübergestellt. Subjektiv sieht es im Experiment so aus, dass der Korridor über die gesamte Breite relativ gleichmäßig ausgenutzt wird. In der Simulation hingegen ist eine Verdichtung der Raumkurven in der unteren Korridorhälfte erkennbar. Das von FDS+Evac berechnete Flussprofil (siehe Abbildung 6.4), welches die Bewegungsrichtung der Agenten bestimmt, scheint nicht der Grund hierfür zu sein. Anhand der Richtung der Vektoren ist keine Tendenz zur unteren Korridorhälfte erkennbar. Eine weitere Ursache für

die Asymmetrie kann der Eingang sein, über den mehr Personen in der unteren Korridorhälfte hinzugefügt wurden als in der oberen Hälfte.

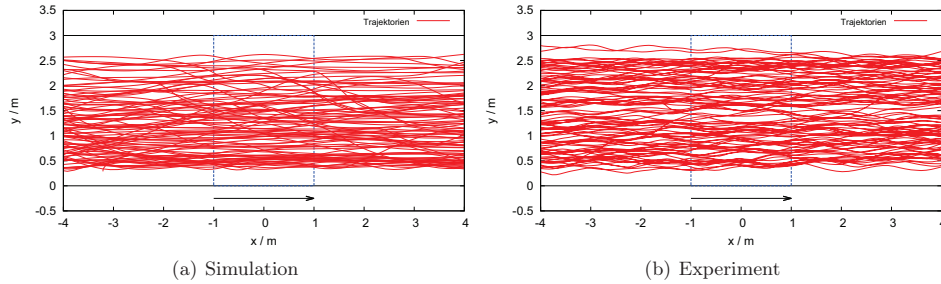


Abbildung 6.3: Visualisierung der extrahierten Trajektorien ($N = 100$) für einen Korridor aus (a) FDS+Evac ($J_{s,Ausgang} \approx 1,0 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$) und (b) einem Experiment ($J_{s,Ausgang} \approx 0,8 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$). Wände sind mit schwarzen durchgezogenen Linien und das Messfeld mit gestrichelten blauen Linien dargestellt. Die Bewegungsrichtung wird durch die Pfeile angegeben. Der experimentelle Datensatz ist entnommen aus [4].

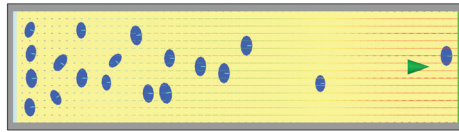


Abbildung 6.4: Flussprofil für einen Korridor in FDS+Evac.

6.2.1.2 Fundamentaldiagramm

Die Messwerte der Simulation (siehe Abbildung 6.5) zeigen für den gesamten Dichtebereich bis knapp $3,5 \text{ m}^{-2}$ eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Der Freiflussast, d. h., der lineare Anstieg des spezifischen Personenflusses bis ca. $1,5 \text{ m}^{-2}$, wird in FDS+Evac richtig reproduziert. Ebenfalls wird die Kapazität der Anlage mit einem maximalen spezifischen Flusswert von ca. $2,1 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$ gut beschrieben. Eine Flussreduktion aufgrund der Überfüllung des Korridors wird durch die Messwerte bei Dichten um $3,0 \text{ m}^{-2}$ sichtbar. Diese Messpunkte stellen die Maximalwerte des experimentellen Datensatzes dar.

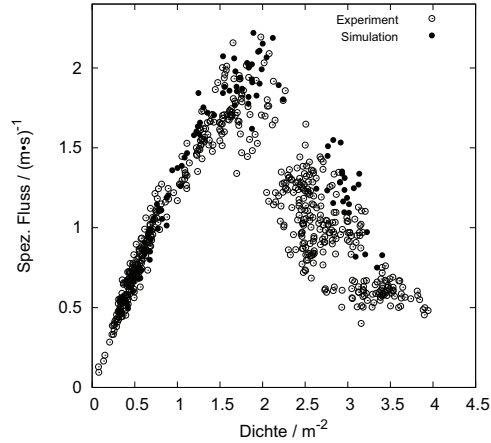


Abbildung 6.5: Vergleich des Fundamentaldiagramms für einen Korridor von FDS+Evac mit einem Experiment. Der experimentelle Datensatz ist entnommen aus [4].

6.2.1.3 Kartendarstellung der Basisgrößen

In Abbildung 6.6 sind die Kartendarstellungen der Basisgrößen präsentiert. Die Dichte im Korridor des Experiments ist symmetrisch an der unteren sowie oberen Wand niedriger als in der Mitte des Korridors. Derartige Randeﬀekte können in der Geschwindigkeits-Karte nicht festgestellt werden; die Karte zeigt eine homogene Verteilung. Folglich ähnelt die Struktur der spezifischen Fluss-Karte der der Dichte-Karte mit erhöhten Flusswerten in der Mitte des Korridors. Die in der Simulation erkennbare Verdichtung der Raumkurven in der unteren Korridorhälfte wird von der Dichte-Karte bestätigt. Im oberen Drittel des Korridors ist die Dichte signifikant niedriger, und es kann keine Symmetrie festgestellt werden. Ähnlich dem Experiment zeigt die Geschwindigkeits-Karte eine homogene Verteilung über den gesamten Korridor mit leicht niedrigeren Werten im linken Randbereich, welche auf die lokal erhöhte Dichte in diesem Gebiet zurückzuführen sind. Ebenfalls treten in der Simulation die höchsten Flusswerte in der Mitte des Korridors auf, jedoch sind die reduzierten Flüsse im oberen und unteren Randbereich unterschiedlich stark ausgeprägt.

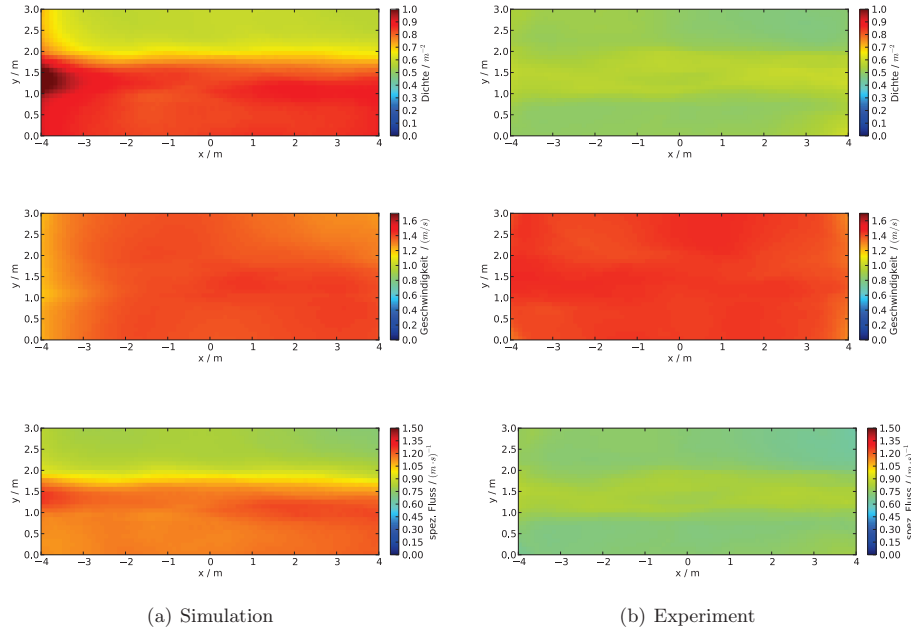


Abbildung 6.6: Kartendarstellung der Kenngrößen für einen Korridor basierend auf dem Datensatz von (a) FDS+Evac ($J_{s,Ausgang} \approx 1,0 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$) und (b) einem Experiment ($J_{s,Ausgang} \approx 0,8 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$) unter Laborbedingungen. Der experimentelle Datensatz ist entnommen aus [4].

6.2.2 T-Kreuzung

Bei diesem Experiment handelt es sich um eine T-Kreuzung, bei der sowohl die zwei zuführenden Korridore als auch der Zielkorridor 2,4 m breit sind. In verschiedenen Durchläufen wurden die Anzahl der Personen sowie die Breiten variiert. Eine detaillierte Beschreibung und Analyse der Experimente unter Laborbedingungen, die hier als Vergleichswerte genutzt werden, befindet sich in [4].

6.2.2.1 Trajektorien

Abbildung 6.7 zeigt den Vergleich der Trajektorien für eine T-Kreuzung aus der Simulation und dem Experiment. Während im Experiment die Breite der beiden zuführenden Korridore komplett ausgenutzt wird, liegen die Raumkurven aus der Simulation nahezu ausschließlich auf der dem Zielkorridor abgewandten Flurhälfte. Diese Verteilung ergibt sich aufgrund des Flussprofils (siehe Abbildung 6.8). Direkt an den Eingängen werden die Personen in Richtung der unteren Wand geleitet. Das wird ebenfalls durch die Bewegungsrichtung der dargestellten Agenten verdeutlicht. Ein dreieckiger «Totraum» im Vereinigungsbereich der beiden Personen-

ströme ist in der Simulation nicht zu erkennen. Es wird sichtbar, dass die Agenten in FDS+Evac bei niedriger Auslastung der Anlage ($J_{s,Ausgang} \approx 1,3 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$) nicht auf dem kürzesten Weg durch die T-Kreuzung geleitet werden.

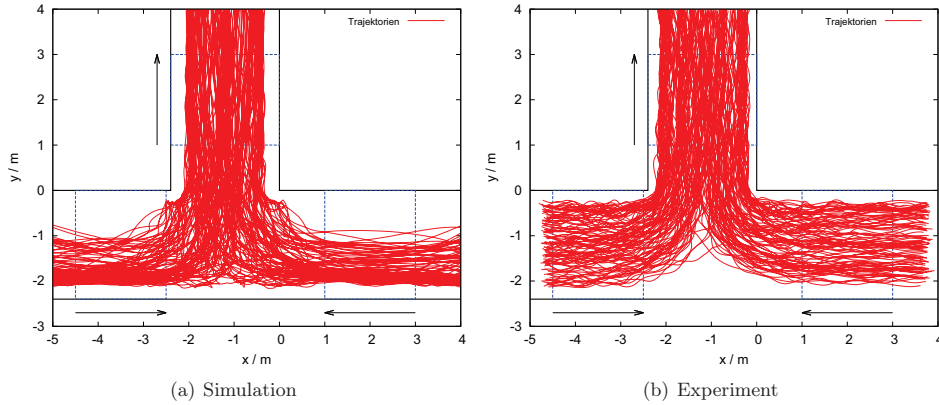


Abbildung 6.7: Visualisierung der extrahierten Trajektorien ($N=208$) für eine T-Kreuzung aus (a) FDS+Evac ($J_{s,Ausgang} \approx 1,3 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$) und (b) einem Experiment ($J_{s,Ausgang} \approx 1,3 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$). Wände sind mit schwarzen durchgezogenen Linien und die Messfelder mit gestrichelten blauen Linien dargestellt. Die Bewegungsrichtung wird durch die Pfeile angegeben. Der experimentelle Datensatz ist entnommen aus [4].

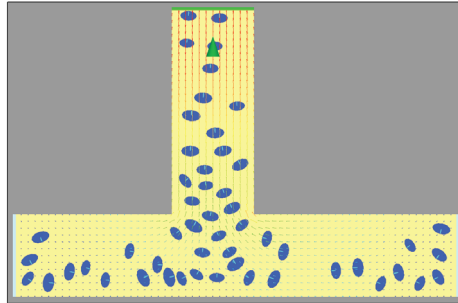


Abbildung 6.8: Flussprofil für eine T-Kreuzung in FDS+Evac. Die Agenten werden direkt nach dem Eingang zur äußeren Wand geleitet.

6.2.2.2 Fundamentaldiagramm

In Abbildung 6.9 sind die Fundamentaldiagramme der T-Kreuzung dargestellt. Die experimentellen Datensätze der beiden zuführenden Korridore vor der Kreuzung stimmen relativ gut überein. Für Dichten zwischen $1,5$ und $3,5 \text{ m}^{-2}$ kann ein konstanter Fluss festgestellt werden. Im Gegensatz dazu zeigen die Messwerte nach der Kreuzung einen kontinuierlichen Anstieg bis $2,5 \text{ m}^{-2}$. Für Dichten größer $1,0 \text{ m}^{-2}$ liegen die entsprechenden Messwerte nach der Kreuzung signifikant höher als vor dem Zusammenströmen. Diese speziellen Verläufe der Fundamental-

diagramme werden von FDS+Evac bedingt reproduziert. Der konstante Personenfluss in den zuführenden Ästen stimmt annähernd mit den experimentellen Datensätzen überein. Die Tendenz zu signifikant höheren Personenflüssen bei gleicher Dichte nach der Kreuzung wird von FDS+Evac richtig berechnet. Allerdings sind die resultierenden Flusswerte, verglichen mit den experimentellen Daten, leicht überschätzt. Maximale Dichten nach der Kreuzung sind in der Simulation mit ca. 2 m^{-2} deutlich niedriger als im Experiment mit etwa 3 m^{-2} .

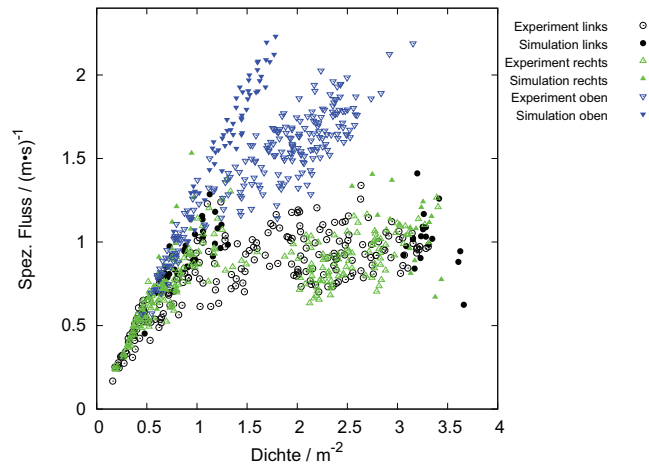


Abbildung 6.9: Vergleich des Fundamentaldiagramms für eine T-Kreuzung von FDS+Evac mit einem Experiment. Der experimentelle Datensatz ist entnommen aus [4].

6.2.2.3 Kartendarstellung der Basisgrößen

Die Kartendarstellungen für eine T-Kreuzung (siehe Abbildung 6.10) zeigen für alle Basisgrößen heterogene Strukturen auf. Im Experiment treten die höchsten Dichten im Vereinigungsbereich der beiden Personenströme nahe den beiden Ecken auf. Dieser Bereich höchster Dichte erstreckt sich etwa über die Hälfte des Zielkorridors. Nahe der unteren Wand treten die niedrigsten Dichten auf. Die Geschwindigkeits-Karte zeigt ungefähr die inverse Struktur zur Dichte-Karte. In der Umgebung der Ecken sind die Gehgeschwindigkeiten aufgrund der höheren Dichte reduziert und nahe der unteren Wand erhöht. Der höchste spezifische Fluss tritt eindeutig in der Mitte des Zielkorridors auf. Die Dichte-Karte der Simulation zeigt eine abweichende Struktur zu der des Experiments. Sehr niedrige Dichten in der oberen Hälfte der zuführenden Korridore sind mit den fehlenden Trajektorien zu begründen (vgl. Abbildung 6.7). Der Bereich höchster Dichte tritt zentral im Vereinigungsgebiet der beiden Personenströme auf und erstreckt sich nicht so weit in den Zielkorridor wie im Experiment. Bezüglich der Geschwindigkeitsverteilung kann allgemein festgehalten werden, dass die räumlichen Unterschiede in der Simulation ausgeprägter sind. Zu Beginn der zuführenden Korridore und am Ende des Zielkorridors treten die höchsten Geschwindigkeiten auf. Im Vereinigungsgebiet der Personenströme sind die Geschwindigkeiten

deutlich reduziert. Der maximal spezifische Fluss tritt ebenfalls mittig im Anschlussflur auf. Kurz zusammengefasst gibt es aufgrund des von FDS+Evac berechneten Flussprofils deutliche Unterschiede zwischen Simulation und Experiment.

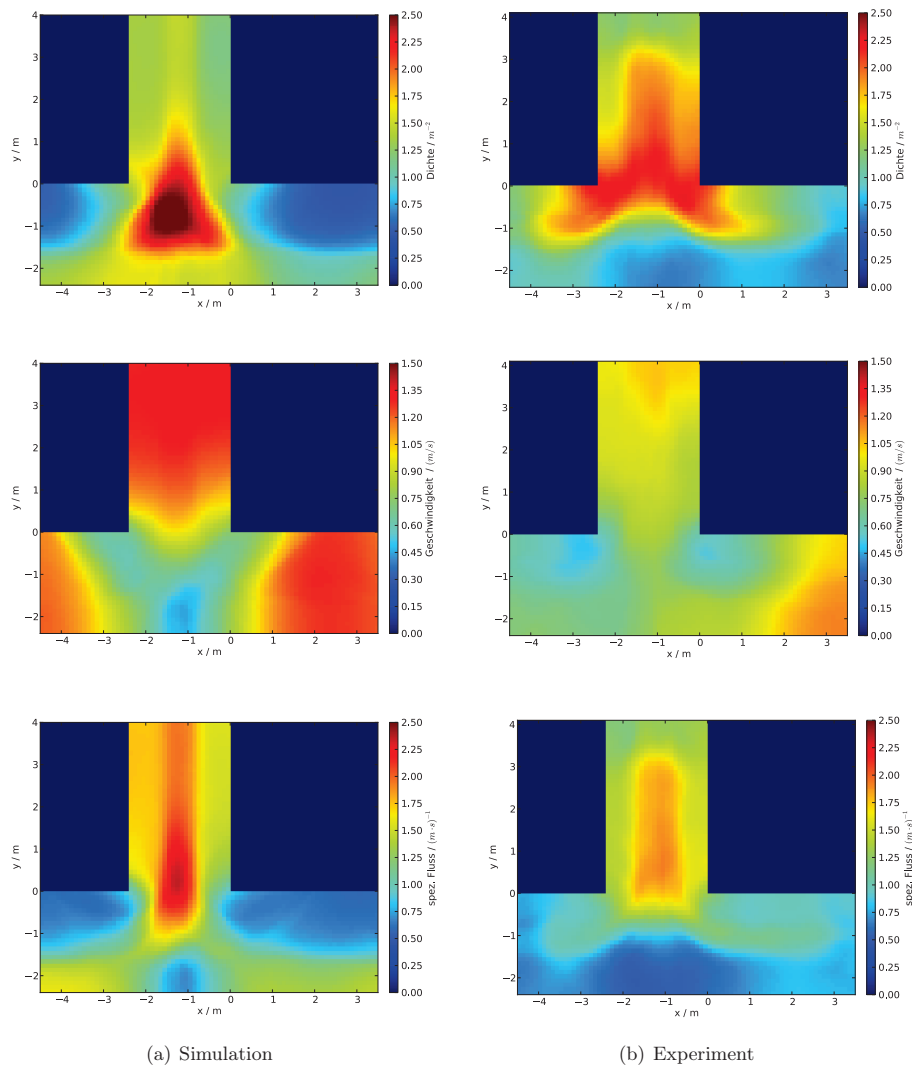


Abbildung 6.10: Kartendarstellung der Kenngrößen für eine T-Kreuzung basierend auf dem Datensatz von (a) FDS+Evac ($J_{s,Ausgang} \approx 1,3 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$) und (b) einem Experiment ($J_{s,Ausgang} \approx 1,3 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$) unter Laborbedingungen. Die Bewegungsrichtung ist von unten nach oben. Der experimentelle Datensatz ist entnommen aus [4].

6.2.3 Ecke

Bei diesem Experiment handelt es sich um eine 90° Kehre, bei der jeder einzelne Korridor 2,4 m breit ist. In verschiedenen Durchläufen wurde die Anzahl der Personen sowie die Breite variiert. Für eine detaillierte Beschreibung und Analyse der Experimente unter Laborbedingungen, die hier als Vergleichswerte genutzt werden, wird auf [10] verwiesen. Kartendarstellungen der Basisgrößen wurden zu diesem Experiment noch nicht veröffentlicht.

6.2.3.1 Trajektorien

Die Visualisierung der extrahierten Trajektorien für eine Ecke (siehe Abbildung 6.11) aus FDS+Evac und einem Experiment zeigt Unterschiede auf. In der Simulation ist eine Verdichtung der Raumkurven nahe der äußeren Wand und im Experiment nahe der inneren Wand sichtbar. In FDS+Evac ergibt sich diese Verteilung aufgrund des Flussprofils (siehe Abbildung 6.12) ähnlich wie bei der T-Kreuzung. Direkt im Anschluss an den Eingang werden die Personen zur äußeren Wand geleitet. Daraus resultiert für die Agenten ein längerer Weg. Im Experiment ist in der Ecke ein «Totraum» sichtbar; diese Fläche wird von den Agenten ausgenutzt.

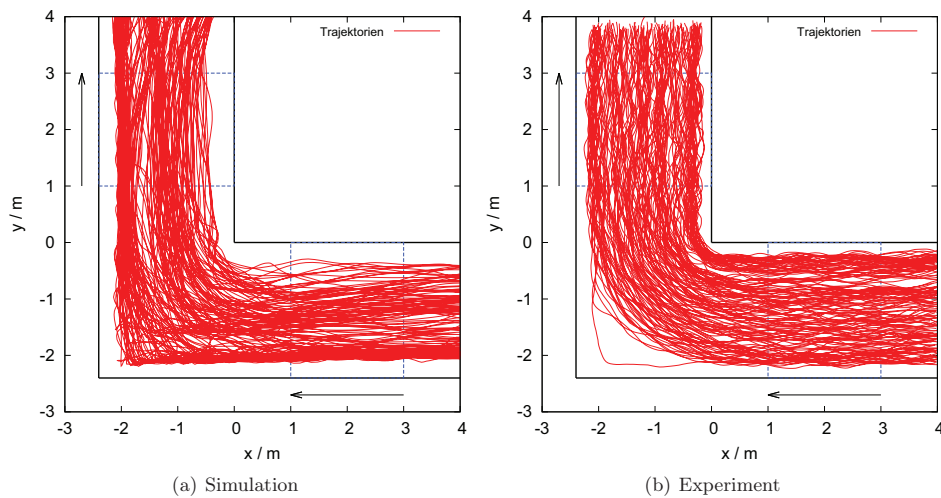


Abbildung 6.11: Visualisierung der extrahierten Trajektorien ($N=161$) für eine Ecke aus (a) FDS+Evac ($J_{s,Ausgang} \approx 1,2 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$) und (b) einem Experiment ($J_{s,Ausgang} \approx 1,1 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$). Wände sind mit schwarzen durchgezogenen Linien und die Messfelder mit gestrichelten blauen Linien dargestellt. Die Bewegungsrichtung wird durch die Pfeile angegeben. Der experimentelle Datensatz ist entnommen aus [10].

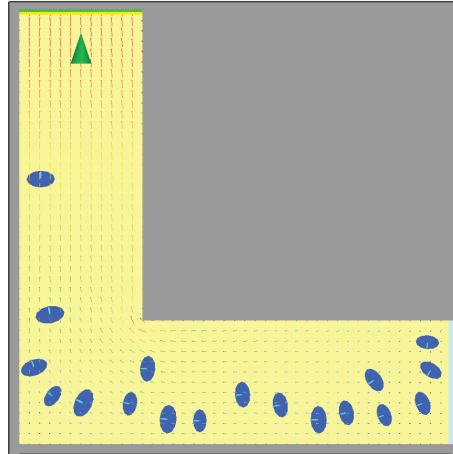


Abbildung 6.12: Flussprofil für eine Ecke in FDS+Evac. Die Agenten werden direkt nach dem Eingang zur äußeren Wand geleitet.

6.2.3.2 Fundamentaldiagramm

Für die Fußgängerbewegung um eine Ecke zeigen die experimentellen Messwerte (siehe Abbildung 6.13) untereinander, gemessen vor und nach der Ecke, eine gute Übereinstimmung. Auffällig ist, dass nach dem Passieren der 90° Kehre die maximale Dichte im Experiment von etwa $2,4 \text{ m}^{-2}$ auf $1,8 \text{ m}^{-2}$ reduziert ist. Der maximal mögliche spezifische Fluss (im Experiment vor und nach der Ecke) ist identisch und liegt bei ca. $1,8 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$. Die geringe Anzahl von Messwerten der Simulation stimmt bei niedrigen Dichten bis ca. $1,0 \text{ m}^{-2}$ gut mit dem experimentellen Datensatz überein. Für Dichten größer $1,0 \text{ m}^{-2}$ weist die Simulation höhere Personenflüsse auf. Maximale Dichten von $2,4 \text{ m}^{-2}$, die experimentell vor der Ecke ermittelt wurden, treten in der Simulation nicht auf. Die maximale Dichte liegt bei etwa $1,5 \text{ m}^{-2}$.

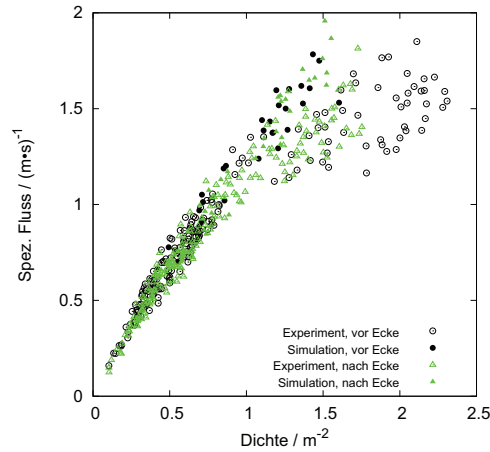


Abbildung 6.13: Vergleich des Fundamentaldiagramms für eine Ecke von FDS+Evac mit einem Experiment. Der experimentelle Datensatz ist entnommen aus [10].

6.2.3.3 Kartendarstellung der Basisgrößen

Die Kartendarstellungen der Kenngrößen basierend auf der Simulation sind in Abbildung 6.14 gezeigt. Ein Vergleich mit experimentellen Daten ist in diesem Fall nicht möglich, weil noch keine Kartendarstellungen zu den Experimenten veröffentlicht wurden. Übereinstimmend mit den extrahierten Trajektorien aus FDS+Evac können grundsätzlich an der Außenseite höhere Dichten festgestellt werden als auf der Innenseite. Der Bereich höchster Dichte befindet sich in Gehrichtung kurz hinter der Winkelhalbierenden nahe der äußeren Wand. Die Geschwindigkeits-Karte zeigt, dass die Agenten beim Betreten der Ecke – der Bereich, in dem die Richtungsänderung stattfindet – ihre Gehgeschwindigkeit reduzieren und nach dem Passieren der Ecke wieder beschleunigen. In der spezifischen Fluss-Karte wird deutlich, dass die äußere Hälfte der Geometrie stärker frequentiert wird als die Innenseite.

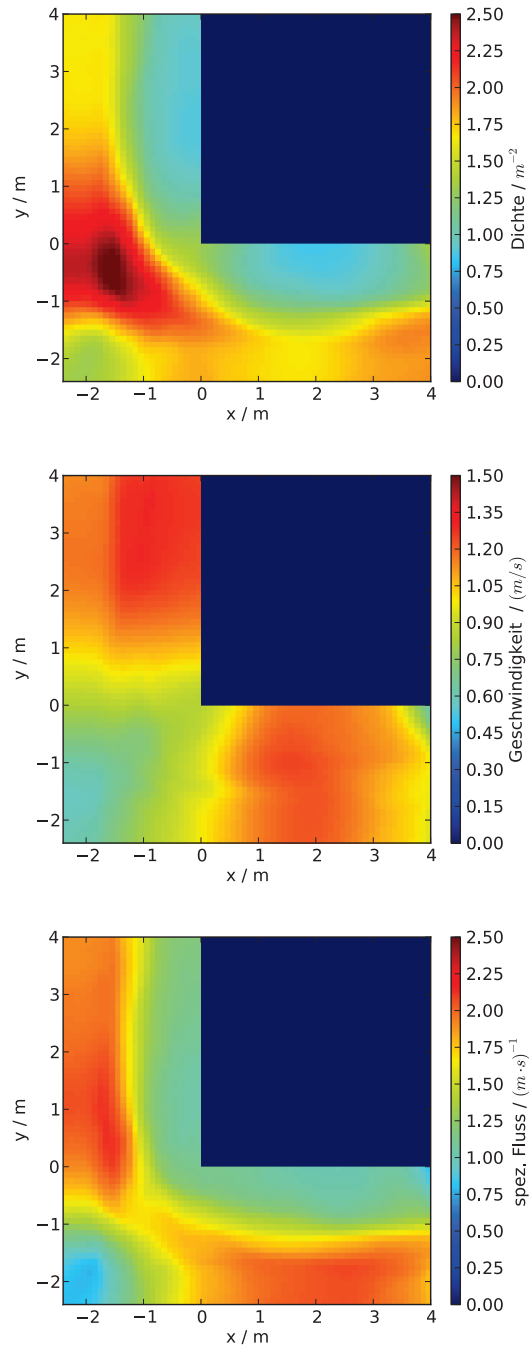


Abbildung 6.14: Kartendarstellung der Kenngrößen für eine Ecke basierend auf dem Datensatz von FDS+Evac ($J_{s,Ausgang} \approx 1,2 (m \cdot s)^{-1}$).

6.3 Simulation und Vergleich ausgewählter Experimente auf der Tribüne

In Kapitel 6.1 wurde die grundlegende Funktionsweise von FDS+Evac vorgestellt und die genutzten Einstellungen beschrieben. Die Fundamentaldiagramme für einfache Geometrien stimmen relativ gut mit experimentellen Daten überein, aber bei der Personenführung gibt es aufgrund des von FDS+Evac erstellten Flussprofils teilweise signifikante Unterschiede. Es stellt sich nun die Frage, ob komplexere Geometrien, die sich aus den vorgestellten Anlagen (Korridor, Ecke, T-Kreuzung) zusammensetzen, realitätsnah reproduziert werden können. Für die weitergehenden Untersuchungen bieten sich die Experimente auf den Tribünen der ESPRIT arena an.

Abbildung 6.15 zeigt die Visualisierung des Experiments MU1 mit Smokeview. Das Flussprofil zeigt eine logische Führung der Agenten in Richtung des Ausgangs. Im Modell wurde eine Zellgröße von 20 cm Kantenlänge zur Darstellung der Geometrie gewählt. Die Durchgangsbreiten in den Reihen sowie die Rettungswegbreiten stimmen mit den Maßen der Tribüne überein. Auch die Verteilung der Agenten in den Reihen wurde für jede Simulation der verschiedenen Experimente angepasst. Treppenelemente sind mit gelben Rechtecken dargestellt, und ein grüner Kegel zeigt in die Richtung des blau/grün eingefärbten Ausgangs.

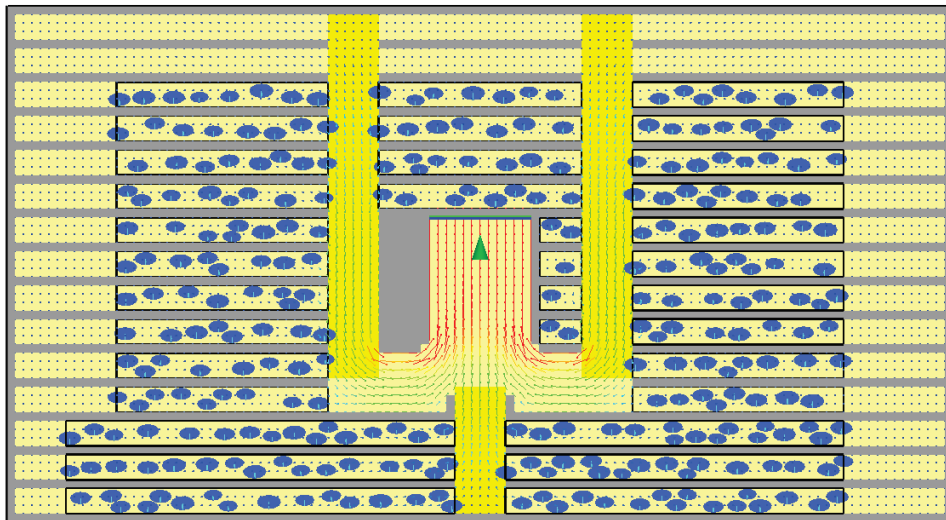


Abbildung 6.15: Darstellung der Tribüne im Unterrang mit Smokeview. Das Flussprofil ist visualisiert. Agenten sind als dunkelblaue Ellipsen dargestellt und deren Bewegungsrichtung wird mit hellblauen Strichen angezeigt. Die schwarzen Rahmen geben die Bereiche der zufälligen Platzierung von Agenten an und der dunkelgrüne Kegel zeigt in Richtung des blau/grün markierten Ausgangs.

6.3.1 Unterrang

6.3.1.1 Experiment MU5

Im Experiment MU5 bewegen sich die Personengruppen 1 und 2 (vgl. Abbildung 5.2a/b) in Richtung Mundloch. Weil diese beiden Zuströme die Kapazität des Mundlochs nicht erreichen, entsteht in diesem Szenario keine Stausituation, und die Wechselwirkungen zwischen den Agenten sind gering. Der effektive Personenfluss an der Austritts-Linie wird also vorrangig durch den Zustrom der beiden Abwärtstreppen bestimmt. Aus diesen Gründen wurde das Experiment MU5 als erstes zu simulierendes Szenario ausgewählt.

Abbildung 6.16a zeigt den Vergleich der Durchtrittszeiten des Experiments mit fünf Simulationen. Die Zeiterfassung erfolgte einheitlich an der Austritts-Linie (vgl. Kapitel 5.3.1.2). Da die Simulationen keine weite Streuung aufweisen, kann auf eine statistische Auswertung verzichtet werden. Insgesamt wird deutlich, dass die simulierten Evakuierungsverläufe über den gesamten zeitlichen Verlauf gut mit dem Experiment übereinstimmen. Folglich kann daraus geschlossen werden, dass der Personenfluss auf beiden Treppen mit FDS+Evac richtig reproduziert wird und der Faktor «FAC_V0_DOWN = 0.7» geeignet ist. Auch die Personendichte im Mundloch wird mit FDS+Evac realitätsnah simuliert (siehe Abbildung 6.16b).

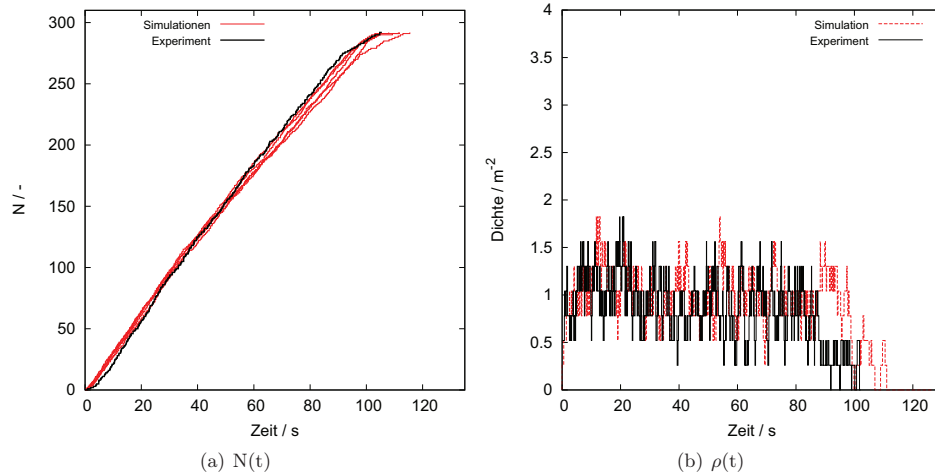


Abbildung 6.16: Vergleich der (a) Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie des Experiments MU5 mit fünf Simulationen und der (b) experimentell ermittelten Dichte im Mundloch mit einer Simulation.

6.3.1.2 Experiment MU1

Das Experiment MU1 kann als Erweiterung des Experiments MU5 angesehen werden. Durch das Hinzufügen der Personengruppe 3 wird die Kapazität des Mundlochs erreicht oder sogar überschritten. Die Dichte im Mundloch steigt an und Ordnungseffekte gewinnen an Bedeutung. Eine niedrige Streuung der Simulationsergebnisse untereinander wird auch durch die $N(t)$ -Diagramme in Abbildung 6.17a deutlich. In blau sind die Simulationen mit FDS+Evac Standard-Einstellungen⁵ dargestellt, und die roten $N(t)$ -Funktionen basieren auf den modifizierten Einstellungen, welche in Kapitel 6.1.2 beschrieben sind. Der gesamte Evakuierungsverlauf wird durch die modifizierten Einstellungen von FDS+Evac gut reproduziert, wobei die Standard-Einstellungen einen zu geringen Personenfluss berechnen.

In Abbildung 6.17b ist der zeitliche Verlauf der Dichte im Mundloch von einer Simulation und dem Experiment dargestellt. Es wird deutlich, dass die Personendichte nahezu über den gesamten Simulationsverlauf leicht unterschätzt wird. Da jedoch der simulierte Personenfluss gut mit dem Experiment übereinstimmt, muss folglich die simulierte Gehgeschwindigkeit überschätzt werden ($J = \rho \cdot v \cdot b$ mit $b = \text{konstant}$). Hier kommt es zu den bereits angesprochenen Ausgleichseffekten; simulierte Dichte und Geschwindigkeit weichen von den experimentellen Werten ab, aber der resultierende Personenfluss ist äquivalent zum realen Flusswert.

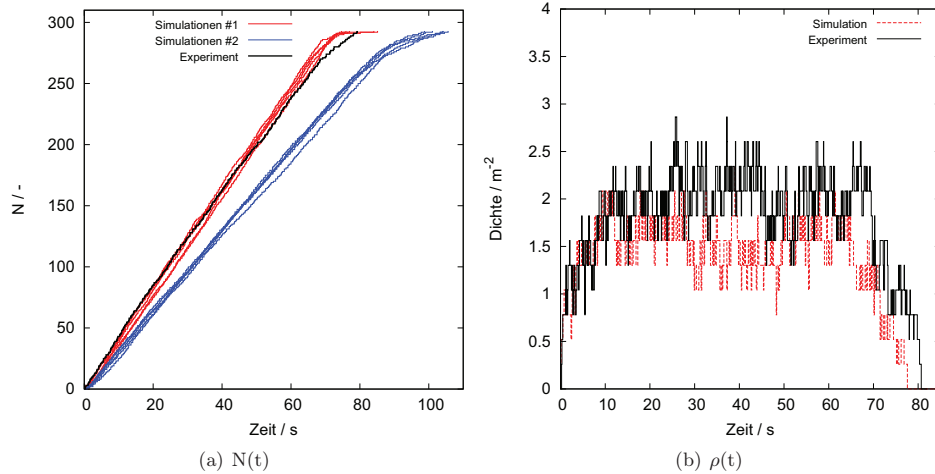


Abbildung 6.17: Vergleich der (a) Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie des Experiments MU1 mit fünf Simulationen (#1 = eigene FDS+Evac Parameter; #2 = FDS+Evac Standard-Parameter mit $FAC_V0_HORI = 1,25 \text{ m/s}$ und $FAC_V0_UP = 0,45$) und der (b) experimentell ermittelten Dichte im Mundloch mit einer Simulation.

⁵Die freie horizontale Gehgeschwindigkeit beträgt $1,25 \text{ m/s}$, und für die Aufwärtsbewegung auf der Treppe wird ein Faktor von « $FAC_V0_UP = 0,45$ » verwendet.

6.3.1.3 Experiment MU1v2

Ziel des Experiments MU1v2 war es, künstlich eine Stausituation zu erzeugen. Über das Schließen eines Türflügels im Mundloch wurde die Ausgangsbreite um 50 % auf 1,20 m reduziert. Damit ist der Zustrom über drei Treppen von 1,20 m Breite deutlich größer als der Abstrom; das Verhältnis von Zustrom zu Abstrom beträgt wegen der reduzierten Kapazität von Treppen knapp 3:1.

Abbildung 6.18a zeigt die $N(t)$ -Diagramme gemessen an den Eintritts-Linien. Der Verlauf der Kurve des Experiments beginnt mit einem steilen Anstieg und flacht etwa bei Sekunde 15 ab, was einem reduzierten Zustrom entspricht. Aufgrund des unausgeglichene Verhältnisses von Zustrom zu Abstrom steigt die Personendichte im Mundloch schnell an (siehe Abbildung 6.18b). Für den restlichen Verlauf des Experiments ist der Zustrom ins Mundloch durch den Abstrom limitiert, und die Dichte schwankt um einen Wert von etwa $2,6 \text{ m}^{-2}$.

Ein «Knick» tritt in den $N(t)$ -Diagrammen der Simulationen ebenfalls bei ca. 15 s auf; jedoch erfolgt die Flussreduzierung in einer kürzeren Zeitspanne. Der schnelle Anstieg der Personendichte im Mundloch und die Limitierung des Zustroms durch den reduzierten Abstrom werden von FDS+Evac richtig reproduziert. Die Dichte im Mundloch wird über den gesamten Verlauf leicht überschätzt. Unterschiedliche maximale Personenzahlen der Simulationen resultieren aus der mehrfachen Erfassung von Agenten an den Messlinien. Im Stau kann es vorkommen, dass Agenten aufgrund der abstoßenden Kräfte minimal zurückgedrängt werden und somit an einer Linie mehrfach gezählt werden; dieses Phänomen wird mit den in FDS+Evac implementierten Messlinien nicht abgefangen.

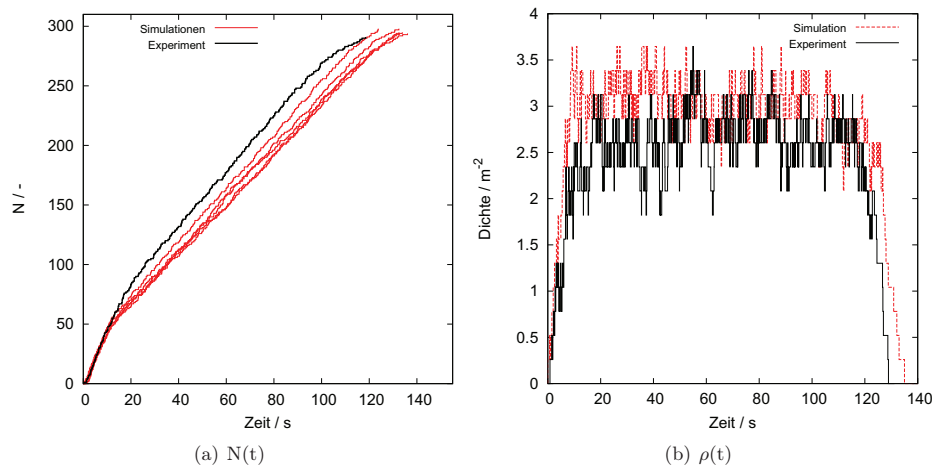


Abbildung 6.18: Vergleich der (a) Durchtrittszeiten an den Eintritts-Linien des Experiments MU1v2 mit fünf Simulationen und der (b) experimentell ermittelten Dichte im Mundloch mit einer Simulation.

6.3.2 Oberrang

In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass der Personenfluss (gemessen im Mundloch) auf der Tribüne des Oberranges niedriger ist als im Unterrang. Da die Simulation der Tribüne mit FDS+Evac zweidimensional dargestellt wird, kann die unterschiedliche Tribünenneigung nur über den Faktor für die Gehgeschwindigkeit auf Treppen in die Simulation eingehen. Gemäß der Muster-Versammlungsstättenverordnung (vgl. Kapitel 2.3) wird jedoch keine Unterscheidung zwischen Unter- und Oberrang vorgenommen; das bedeutet, dass der Oberrang mit den gleichen Einstellungen wie der Unterrang zu simulieren ist. Im Gegensatz zum Unterrang befinden sich im Oberrang auch links vom Mundloch Sitzplätze (siehe Abbildung 6.15), ansonsten ist die Geometrie identisch.

6.3.2.1 Experiment MO5

Abbildung 6.19a zeigt den Vergleich von Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie des Experiments MO5 mit zwei Personenströmen und fünf Simulationen. Bis Sekunde 70 verlaufen die Funktionen nahezu parallel, folglich stimmen die simulierten Personenflüsse gut mit dem Experiment überein. Der mittlere Personenfluss beträgt etwa $2,9 \text{ s}^{-1}$. Nach 70 Sekunden besteht der Zustrom ins Mundloch nur noch aus Gruppe 2 (vgl. Abbildung 5.2b), Gruppe 1 hat die Tribüne bereits verlassen. Die Personendichte im Mundloch (siehe Abbildung 6.19b) wird bis Sekunde 70 von FDS+Evac unterschätzt; folglich werden die Gehgeschwindigkeiten überschätzt.

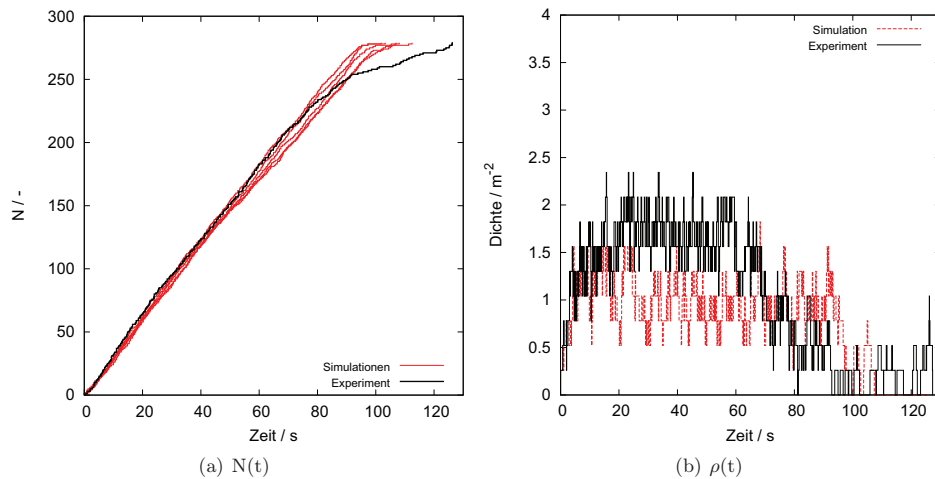


Abbildung 6.19: Vergleich der (a) Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie des Experiments MO5 mit fünf Simulationen und der (b) experimentell ermittelten Dichte im Mundloch mit einer Simulation.

6.3.2.2 Experiment MO1

Das Hinzufügen der Personengruppe 3 führt zu signifikanten Unterschieden zwischen Simulation und Experiment MO1 (siehe Abbildung 6.20). Im Experiment beträgt der Personenfluss innerhalb der ersten 50 Sekunden $3,5\text{ s}^{-1}$ und der mittlere Fluss der Simulationen $4,1\text{ s}^{-1}$. Auch die Dichte im Mundloch weicht signifikant vom Experiment ab. In den ersten 50 Sekunden schwankt die Dichte im Experiment um einen Wert von ca. $2,5\text{ m}^{-2}$ und in der Simulation um ca. $1,5\text{ m}^{-2}$.

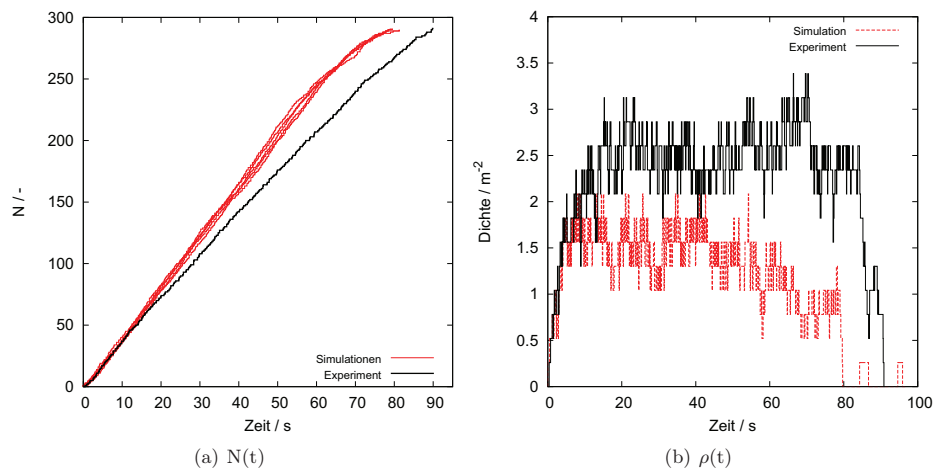


Abbildung 6.20: Vergleich der (a) Durchtrittszeiten an der Austritts-Linie des Experiments MO1 mit fünf Simulationen und der (b) experimentell ermittelten Dichte im Mundloch mit einer Simulation.

6.3.2.3 Experiment MO1v2

In Abbildung 6.21a sind die $N(t)$ -Kurven der Simulationen und des Experiments MO1v2 mit geschlossenem Türflügel, gemessen an den Eintritts-Linien, dargestellt. Bis zum «Knick» im $N(t)$ -Diagramm verlaufen die Funktionen von Simulationen und Experiment nahezu deckungsgleich. Anschließend, wenn der Personenfluss durch den geschlossenen Türflügel limitiert wird, überschätzt FDS+Evac den Fluss. Die simulierte Personendichte im Mundloch (siehe Abbildung 6.21b) weist keine signifikanten Unterschiede auf.

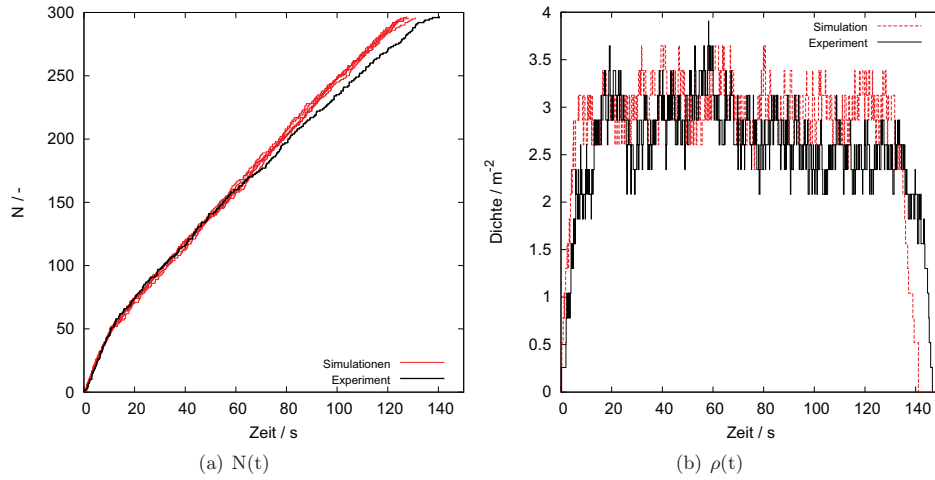


Abbildung 6.21: Vergleich der (a) Durchtrittszeiten an den Eintritts-Linien des Experiments MO1v2 mit fünf Simulationen und der (b) experimentell ermittelten Dichte im Mundloch mit einer Simulation.

6.4 Zusammenfassung

In Kapitel 6 wird anhand des Programms FDS+Evac beispielhaft gezeigt, welche Möglichkeiten es zur Validierung eines raumkontinuierlichen Modells gibt. Es wurden grundlegende Informationen über das mikroskopische Modell präsentiert und die genutzten Einstellungen angegeben. Basierend auf den vorgestellten Tribünenexperimenten und weiteren Experimenten aus dem Forschungsprojekt HERMES konnten Simulationsergebnisse quantitativ mit realen Messwerten verglichen und bewertet werden. Dadurch wurde die Leistungsfähigkeit (im Sinne der Realitätsnähe) von FDS+Evac analysiert und Verbesserungspotenziale identifiziert.

Die grafische Gegenüberstellung der extrahierten Trajektorien ermöglicht eine gute visuelle Einschätzung, ob die Agenten realitätsnah durch eine Geometrie geführt werden. Im Korridor wurde direkt sichtbar, dass die untere Flurhälfte bei einem spezifischen Fluss von $J_{s,Ausgang} \approx 1,0 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$ mehr frequentiert wird als die obere Hälfte. Bei der T-Kreuzung sowie der Ecke war zu erkennen, dass die Agenten im Gegensatz zu den Probanden im Experiment nicht den kürzesten Weg wählen. Diese Beobachtungen konnten mit den Kartendarstellungen der Basisgrößen belegt werden. Ursache für die abweichenden Raumkurven in der Simulation der T-Kreuzung und der Ecke ist das Flussprofil, welches von FDS+Evac berechnet wird. Die Agenten werden direkt im Anschluss an den Eingang zur unteren Wand geleitet. In den zuführenden Korridoren der T-Kreuzung beträgt der spezifische Fluss $0,5 \cdot J_{s,Ausgang} \approx 0,65 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$. Aufgrund des geringen Flusses und der niedrigen Dichte ist es den Agenten möglich, dem Flussprofil zu folgen. Dadurch wird nur die halbe Korridorbreite ausgenutzt (siehe Abbildung 6.7a). In der Simulation der Ecke ist das Flussprofil identisch, aber der spezifische Fluss mit $J_{s,Ausgang} \approx 1,2 \text{ (m} \cdot \text{s)}^{-1}$

nahezu doppelt so groß. Es wird deutlich, dass auch bei höheren Fluss- und Dichtewerten das Flussprofil Einfluss auf die Bewegung von Agenten nimmt, allerdings verhindert es nicht die Ausnutzung der nahezu gesamten Korridorbreite (siehe Abbildung 6.11a und Abbildung 7.2 im Anhang B). Auch wenn die empirische Beziehung zwischen Fluss und Dichte in den verschiedenen Messbereichen relativ gut von FDS+Evac reproduziert wird, ist die Prognose der Staubereiche mit Unsicherheiten behaftet; das zeigt ein Vergleich der Dichte-Karten für die T-Kreuzung. Für die Ecke ist der direkte Vergleich mit einem Experiment nicht möglich, jedoch erscheint die Position des Staubereichs unrealistisch.

Eine Reproduktion der Tribünenexperimente im Unterrang ist mit FDS+Evac ohne gravierende Abweichungen möglich. Das zugrundeliegende Flussprofil für die Tribüne ist plausibel, und die mehrfach durchgeführten Simulationen für das gleiche Szenario weisen nur unwesentliche Differenzen auf. Fünf Simulationen stellen bei diesen Szenarien die Spannweite des Räumungsverlaufs gut dar; deshalb konnte auf eine statistische Auswertung verzichtet werden. Die Simulation und der Vergleich mit dem Experiment MU5 zeigen, dass der Fluss zweier einzelner Personenströme auch auf Treppen abwärts realitätsnah reproduziert wird. Gemessene Personendichten im Mundloch stimmen hinreichend mit experimentellen Daten überein. Veränderungen im Szenario, beispielsweise das Hinzufügen eines dritten Personenstromes oder das Schließen eines Türflügels, werden mit FDS+Evac quantifiziert.

Die experimentelle Auswertung der Tribünenexperimente und der Vergleich von Messwerten des Unter- und Oberranges hat gezeigt, dass die Dynamik der Fußgänger im Oberrang, aufgrund der steileren Neigung, unterschiedlich ist. Diese besondere Gegebenheit kann in FDS+Evac nur in Bezug auf die Gehgeschwindigkeit bzw. den Personenfluss durch die Wahl eines anderen Faktors (FAC_V0_UP bzw. FAC_V0_DOWN) berücksichtigt werden; die resultierende Dichte ist abhängig von den akkumulierten Kräften (siehe Kapitel 6.1.1). Auch wenn der Fluss im Experiment MO5 vergleichbar mit dem Flusswert der Simulationen ist, weichen die gemessenen Dichten im Mundloch voneinander ab. Diese Unterschiede werden im Szenario MO1 verdeutlicht. Das Szenario MO1v2 wird von FDS+Evac am besten reproduziert.

Bezüglich der Anwendung von FDS+Evac ist zu erwähnen, dass diese bislang unkomfortabel ist. Da es sich um ein Simulationsprogramm mit stochastischer Komponente handelt, würde eine automatische Durchführung mehrerer Simulationsläufe Sinn machen. Ebenfalls ist die verwendete «Zufallszahl» der jeweiligen Simulation, welche bspw. die Verteilung von Personen im Raum oder auch die Verteilung von Gehgeschwindigkeiten beeinflusst, für den Anwender nicht direkt einzusehen oder manuell wählbar. Folglich kann eine durchgeführte Simulation ohne in den Quellcode einzugreifen nicht zu einem späteren Zeitpunkt gezielt wiederholt werden.

Kapitel 7

Fazit und Ausblick

Die effektive Dauer der Entleerung einer Tribüne wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst. Unabhängig von der jeweiligen Geometrie einer Tribüne ist das Publikum unterschiedlich, das Wetter wechselhaft und auch technische Störungen sind unvorhersehbar. Menschen sind Individuen, deren Verhalten in letzter Konsequenz nicht planbar ist und dessen Bewegungen nur bedingt mit physikalisch mathematischen Modellen beschrieben werden können. Experimente unter Laborbedingungen bieten jedoch die Möglichkeit, äußere Faktoren zu minimieren und spezifische Einflussgrößen gezielt zu untersuchen.

Als Datenbasis für diese Untersuchungen dienen Fußgängerexperimente unter Laborbedingungen, die im Rahmen des Forschungsprojektes HERMES in der ESPRIT arena durchgeführt wurden. Die Auswertung basiert auf mehr als 20 Experimenten, in denen jeweils bis zu 300 Probanden involviert waren. Ergänzt werden die Laborexperimente durch Feldstudien, die ebenfalls in der ESPRIT arena Düsseldorf und dem BORUSSIA-PARK Mönchengladbach stattfanden.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zum Verständnis des Fußgängerverkehrs auf Tribünen zu leisten, um zukünftig Maßnahmen ableiten zu können, die den Räumungsprozess optimieren. Weil Tribünen auf Treppen als Teil des Rettungsweges angewiesen sind, wird eine detaillierte Analyse der Fußgängerdynamik auf Treppen präsentiert. Des Weiteren wurden Auswirkungen verschiedener Einflussgrößen, wie die unterschiedliche Neigung der Tribüne, die Positionierung von Sicherheitspersonal und das Verhältnis der akkumulierten Breiten der Zuwege zur Ausgangsbreite, auf den Personenfluss und die Dichte im Mundloch quantifiziert. Basierend auf diesen Ergebnissen wird geprüft, inwieweit ein Simulationsprogramm derartige Szenarioänderungen reproduzieren kann.

Zum Einstieg in das Thema wurde die historische Entwicklung der Fußballstadien vom Vereinsplatz bis zur Multifunktionsarena vorgestellt. Die Vermutung, dass es einen Trend zu immer größeren Fußballstadien gibt, konnte von 1888 bis heute widerlegt werden. Eröffnet wurden die größten deutschen Stadien zumeist vor 1974 und nicht in den letzten Jahren. Von 111 (41 %) der

289 erfassten Fußballstadien ist bekannt, dass sich das Fassungsvermögen im Laufe der Zeit verkleinert hat. Bezogen auf das Verhältnis der Personen pro 0,6 m Mundlochbreite hat der Vergleich neun deutscher Fußball-Bundesligastadien gezeigt, dass es signifikante Unterschiede gibt; die Spanne reicht von 85 bis $367 \frac{\text{Personen}}{0,6 \text{ m}}$. Am häufigsten liegt dieses Verhältnis zwischen 200 und 250 Personen pro 0,6 m Mundlochbreite.

Bezüglich der Analyse des Fundamentaldiagramms für Treppen wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Die Fundamentaldiagramme der vier maßgeblichen Planungshandbücher stimmen für niedrige Dichten gut mit experimentellen Daten überein, jedoch wachsen die Unsicherheiten mit steigender Dichte. Maximale spezifische Flusswerte für die Abwärtsbewegung von $1,25 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ und Aufwärtsbewegung von $1,22 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ konnten mit experimentellen Daten belegt werden. Die eigene Feldstudie auf der Außentreppe hat gezeigt, dass diese Werte jedoch Maximalwerte sind und nicht über einen längeren Zeitraum während der Entleerung eines Stadions aufrecht erhalten werden können. Über 14 Minuten wurde ein mittlerer spezifischer Fluss von $0,73 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ gemessen. Ein Zusammenbruch des Personenflusses bedingt durch eine Überfüllung der Treppe konnte mittels der experimentellen Datenbasis nicht nachgewiesen werden. Die eigenen Untersuchungen auf der Außentreppe und den Tribünentreppen zeigen für Dichten größer als $2,0 \text{ m}^{-2}$ gegensätzliche Entwicklungen auf. Die niedrigere Kapazität der Tribünentreppen im Oberrang ($J_{s,max} \approx 1,3 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$) im Vergleich zu den Tribünentreppen im Unterrang ($J_{s,max} \approx 1,5 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$) verdeutlicht, dass eine Änderung der Treppenneigung um 8° im Fundamentaldiagramm sichtbar wird. Der Vergleich von Feldstudien ($J_{s,max} \approx 1,1 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$) und Experimenten unter Laborbedingungen ($J_{s,max} \approx 1,5 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$) auf der Außentreppe zeigt, dass die entsprechenden spezifischen Flusswerte einer bestimmten Dichte im Experiment höher sind als in einer Alltagssituation. Die ermittelten Karten der Basisgrößen für das Experiment «Treppe abwärts» deuten an, dass die Übergänge einer Treppe den flussreduzierenden Faktor darstellen. In diesem Experiment konnten die Übergänge nur in Kombination mit der Kehre analysiert werden. Kritische Dichten unter Staubedingungen traten auf der Innenseite vor der Kehre auf. Zukünftig sollte weiter untersucht werden, ob Treppen ohne Kehre aus Sicherheitsgründen und zur Steigerung der Leistungsfähigkeit zu bevorzugen sind.

Gemäß der Muster-Versammlungsstättenverordnung werden Rettungswegbreiten in Abhängigkeit der darauf angewiesenen Personenzahl bemessen, und es wird bezüglich der Kapazität eines Rettungsweges nicht zwischen einer Treppe oder einem horizontalen Korridor unterschieden. Bezogen auf die in zwei Ränge unterteilte Tribüne der ESPRIT arena zeigen die durchgeführten Experimente, dass dieser Ansatz nicht optimal ist. Im Experiment 1 beträgt der effektive Personenfluss im Unterrang $3,8 \text{ s}^{-1}$ und im Oberrang $3,3 \text{ s}^{-1}$; anders ausgedrückt kann im Unterrang alle zwei Sekunden eine Person mehr das Mundloch verlassen als im Oberrang. Über alle Experimente gemittelt ist der Fluss im Oberrang 12% niedriger als im Unterrang. Im Experiment 5 beträgt das Verhältnis der akkumulierten Breiten der zuführenden Treppen zur Ausgangsbreite 1:1, wie es sich aus den Anforderungen der MVStättV ergeben kann und führt nicht zur optimalen Ausnutzung der Mundlochbreite. Durch eine Erhöhung dieses Verhältnisses auf 1,5:1 (Experiment 1) konnte der Fluss im Mundloch signifikant gesteigert werden;

im Unterrang um $0,7 \text{ s}^{-1}$ (23 %) und im Oberrang um $0,8 \text{ s}^{-1}$ (32 %). Folglich ist der Ansatz der MVStättV, Treppen und Flure als Rettungsweg gleichzusetzen, nicht sinnvoll. Das belegen auch die entsprechenden Fundamentaldiagramme. Die Kapazität einer Treppe abwärts liegt bei etwa $1,5 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ und die Kapazität eines Korridors bei ca. $2,2 (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$. Empfehlenswert ist die Berücksichtigung effektiver Flusswerte, wozu in dieser Dissertation ein erster Beitrag geleistet wird. Eine überraschende Erkenntnis hat das Experiment 1v2 mit geschlossenem Türflügel geliefert; der Fluss im Mundloch des Unterranges beträgt $2,3 \text{ s}^{-1}$ und des Oberranges $2,0 \text{ s}^{-1}$. Obwohl ausgeschlossen werden kann, dass der geringere Zustrom über die drei Treppen im Oberrang der flussreduzierende Faktor ist, ist der Personenfluss im Unterrang höher als im Oberrang. Psychologische Einflüsse scheinen der Grund zu sein. Die Zuschauer gehen auf der steileren Treppe vorsichtiger bzw. langsamer und behalten diese niedrigere Geschwindigkeit auch für den horizontalen Bereich im Mundloch bei. Mit den Experimenten konnte ebenfalls quantifiziert werden, wie die Positionierung des Sicherheitspersonals die Gesamtträumungszeit beeinflusst. Im Unter- sowie Oberrang reduziert ein Ordner an Position 1 den Fluss lediglich um 3 %. Eine Positionierung des Sicherheitspersonals direkt im Mundloch an Position 2 schränkt den Fluss im Unterrang um 8 % und im Oberrang um 6 % ein. Ähnlich wie bei den Treppenexperimenten wurde festgestellt, dass in den Laborexperimenten signifikant höhere Personenflüsse im Mundloch aufgetreten sind als in den Feldstudien. Im Experiment MU1 beträgt der effektive Fluss $3,8 \text{ s}^{-1}$, und in den Feldstudien im Sitzplatzbereich der ESPRIT arena liegen einzelne Maxima bei $2,6$ und $3,0 \text{ s}^{-1}$. Es bleibt die Frage offen, welche Flusswerte für die Abschätzung von Räumungszeiten im Gefahrenfall realistisch sind. Der Vergleich der Feldstudien untereinander zeigt, dass im Stehplatzbereich ($\rho_{max} = 4,4 \text{ m}^{-2}$) deutlich höhere Personendichten im Mundloch gemessen wurden (höheres Gefahrenpotenzial) als im Sitzplatzbereich ($\rho_{max} = 2,9 \text{ m}^{-2}$); die maximalen spezifischen Flusswerte unterscheiden sich jedoch kaum. Das führt zu der Überlegung, durch Maßnahmen die Dichte im Mundloch des Stehplatzbereiches zu senken ohne den Fluss damit einzuschränken. Bezüglich der Kapazität konnte trotz unterschiedlicher Mundlochgeometrie und Personenführung kein Unterschied zwischen den Feldstudien in der ESPRIT arena und dem BORUSSIA-PARK festgestellt werden.

Bei der Interpretation der Messwerte aus den Laborexperimenten (Treppe sowie Tribüne) ist zu berücksichtigen, dass keine statistische Auswertung möglich war und es sich um Einzelwerte für jeden Durchlauf handelt. Für Folgeexperimente ist es empfehlenswert, mehrere Durchläufe mit gleichen Randbedingungen durchzuführen, damit statistische Schwankungen ermittelt werden können. Um die Datenbasis zu vergrößern und Resultate aus den Laborexperimenten besser einschätzen zu können, wurden die Laborexperimente mit vergleichbaren Feldversuchen ergänzt. Zukünftig ist eine Erweiterung der experimentellen Datenbasis notwendig, um vorhandene Messwerte abzusichern.

Das letzte Kapitel baut auf die experimentellen Untersuchungen auf. Es wird beispielhaft an FDS+Evac gezeigt, welche Möglichkeiten experimentelle Daten zur Validierung eines raumkontinuierlichen Simulationsprogramms bieten. Würde sich die Validierung ausschließlich auf die Gesamtträumungszeit der Experimente im Unterrang der Tribüne beziehen, so könnte das

Fazit lauten, dass von FDS+Evac teilweise exzellente Resultate erzielt werden. Die detaillierte Betrachtung der einzelnen Geometrien Korridor, T-Kreuzung und Ecke zeigt jedoch, dass insbesondere die Führung der Agenten über das berechnete Flussprofil Verbesserungspotenzial bietet. Bei der Simulation der Tribüne ist dieses Defizit nicht aufgefallen; das Flussprofil ist plausibel, was an der geringeren Breite der Gänge von maximal 1,2 m (das Mundloch ausgenommen) liegen kann. Unterschiedliche Bewegungspfade von Agenten und Testpersonen in einer Geometrie können durch die visuelle Betrachtung der Trajektorien direkt festgestellt werden und bieten einen guten Anhaltspunkt, ob Staubereiche richtig prognostiziert werden. Bei der Verwendung von FDS+Evac empfiehlt sich, wie auch im Handbuch erwähnt, bei jeder Simulation ein Plausibilitätscheck des berechneten Flussprofils. Um die räumliche Nutzung tiefergehend zu untersuchen, bietet sich die Kartendarstellung der Basisgrößen an. Über die Herleitung des Fundamentaldiagramms in verschiedenen Messbereichen kann geprüft werden, ob die dichteabhängige Gehgeschwindigkeit quantitativ von der Software richtig beschrieben wird. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für die Validierung einer Simulationssoftware die Betrachtung der Gesamträumungszeit und Analyse des Fundamentaldiagramms nicht ausreicht. Entscheidend ist neben diesen Kriterien die realitätsnahe Berechnung von Bewegungspfaden für die Agenten, um Staubereiche richtig darzustellen.

Anhang A

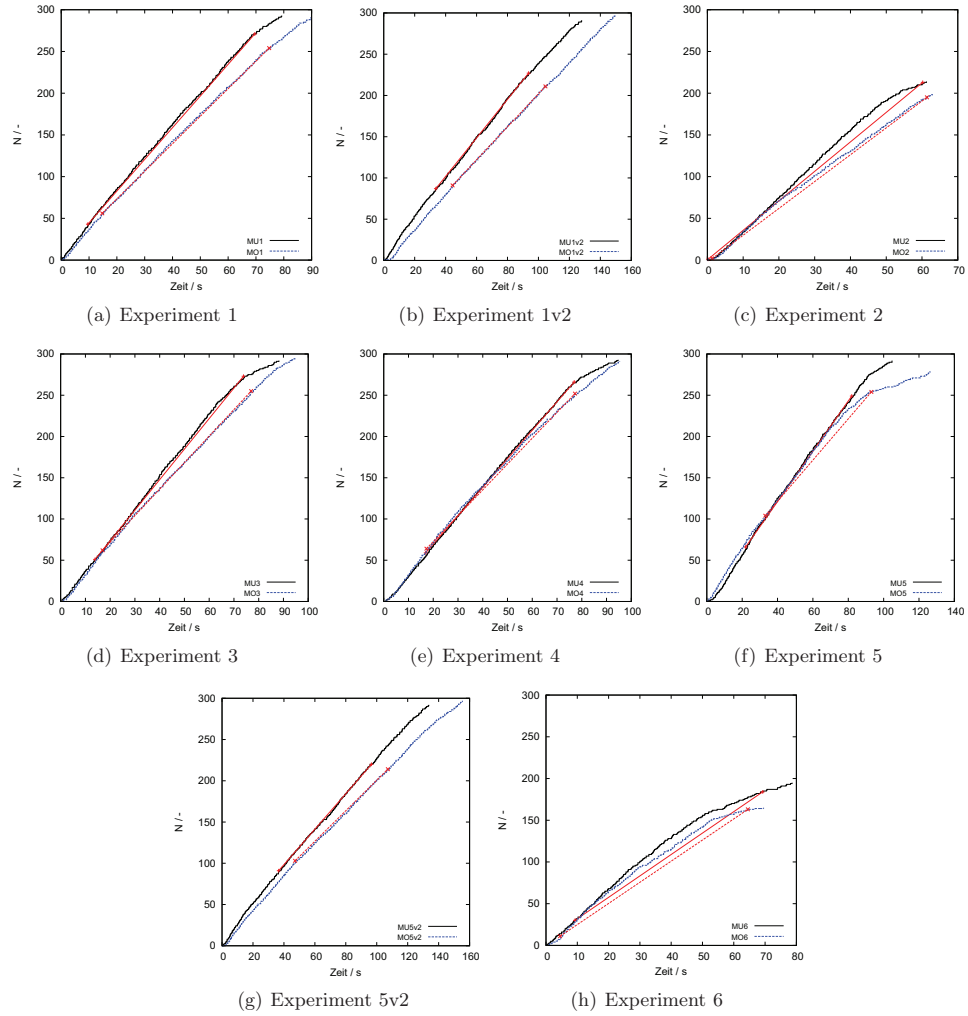


Abbildung 7.1: Durchtrittszeiten an den Austritts-Linien aller Experimente auf den Tribünen im Unter- und Oberrang. Die Auswahl des Zeitintervalls zur Berechnung des effektiven Personenflusses gemäß der Beschreibung in Kapitel 5.3.1.2 ist mit einer roten Linie dargestellt.

Anhang B

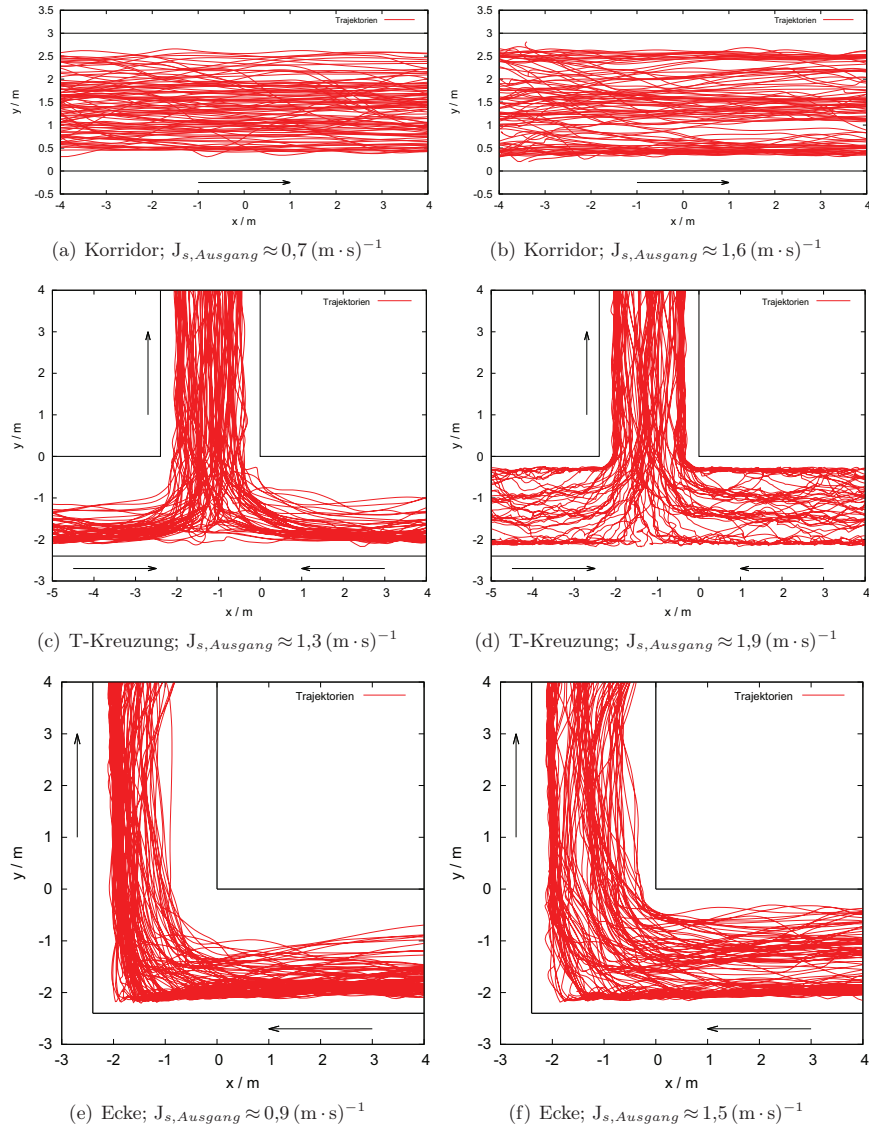


Abbildung 7.2: Visualisierung von jeweils 100 Trajektorien aus der Simulation von verschiedenen Geometrien mit FDS+Evac bei unterschiedlichen Auslastungen der Anlage. In (d) sind beide zuführenden Korridore gestaut. Wände sind mit schwarzen Linien dargestellt. Die Bewegungsrichtung wird durch die Pfeile angegeben.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Boltes, M. Chraibi, U. Kemloh, and J. Liddle, "Tracking, Analysis and Simulation of Crowds - Poster at ASIM-Workshop - Trends in Computational Science and Engineering: Foundations of Modeling and Simulation," 2010.
- [2] "Hermes - Investigation of an evacuation assistant for use in emergencies during large-scale public events," <http://www.fz-juelich.de/jsc/hermes>, March 2011.
- [3] W. H. Skrentny, *Das große Buch der deutschen Fußball-Stadien*. Verlag: Die Werkstatt, Göttingen, 2010.
- [4] J. Zhang, W. Klingsch, A. Schadschneider, and A. Seyfried, "Transitions in pedestrian fundamental diagrams of straight corridors and T-junctions," *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2011, arXiv:1102.4766. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1102.4766>
- [5] W. M. Predtetschenski and A. I. Milinski, *Personenströme in Gebäuden - Berechnungsmethoden für die Projektierung*. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld, 1971, original in Russian, Stroiizdat Publishers, Moscow, 1969.
- [6] U. Weidmann, "Transporttechnik der Fussgänger," Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, ETH Zürich, Tech. Rep. Schriftenreihe des IVT Nr. 90, 1993, zweite, ergänzte Auflage.
- [7] H. E. Nelson and F. W. Mowrer, "Emergency Movement," in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd ed., P. J. DiNenno, Ed. Quincy MA: National Fire Protection Association, 2002, ch. 14, pp. 367–380.
- [8] J. J. Fruin, *Pedestrian Planning and Design*. Elevator World, New York, 1971.
- [9] T. Korhonen and S. Hostikka, "Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac - Technical Reference and User's Guide," *VTT Technical Research Centre of Finland*, May 2010. [Online]. Available: www.vtt.fi/fdsevac/
- [10] J. Zhang, W. Klingsch, T. Rupprecht, A. Schadschneider, and A. Seyfried, "Empirical study of turning and merging of pedestrian streams in T-junction," *ArXiv e-prints*, December 2011.
- [11] T. Meier, "Personenführung auf Tribünen - Historische Entwicklung und Vergleich ausgewählter Bundesliga Stadien," Bachelor Thesis, Bergische Universität Wuppertal, 2011.
- [12] Stiftung Warentest Berlin, "Viermal die rote Karte," vol. 2, pp. 78–84, 2006.

- [13] “Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung - MVStättV),” Juni 2005.
- [14] A. Seyfried, T. Rupprecht, A. Winkens, B. Passon, O. Steffen, W. Klingsch, and M. Boltes, “Capacity estimation for emergency exits and bottleneck,” in *Proceedings of the Interflam 2007*. Interscience, 2007, pp. 247–258.
- [15] A. Seyfried, M. Boltes, J. Kähler, W. Klingsch, A. Portz, T. Rupprecht, A. Schadschneider, B. Steffen, and A. Winkens, “Enhanced empirical data for the fundamental diagram and the flow through bottlenecks,” in *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, W. W. F. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, Eds. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, pp. 145–156. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/0810.1945>
- [16] M. Müller, “Fundamentaldiagramme von Personenströmen auf Tribünentreppen - Vergleich unterschiedlicher Steigungen am Beispiel der ESPRIT arena,” Bachelor Thesis, Bergische Universität Wuppertal, 2010.
- [17] J. Zhang and A. Seyfried, “Empirical characteristics of different types of pedestrian streams,” *ArXiv e-prints: 1207.5931*, July 2012.
- [18] J. Zhang, W. Klingsch, A. Schadschneider, and A. Seyfried, “Ordering in bidirectional pedestrian flows and its influence on the fundamental diagram,” *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, vol. 2, p. 2, February 2012.
- [19] C. Rogsch, W. Klingsch, A. Seyfried, and H. Weigel, “How reliable are commercial softwaretools for evacuation simulation?” in *Proceedings of the Interflam 2007*. Interscience, 2007, pp. 235–246.
- [20] S. Holl and A. Seyfried, “Hermes - an Evacuation Assistant for Mass Events,” *inSiDe*, vol. 7, no. 1, pp. 60–61, 2009. [Online]. Available: http://inside.hlr.de/pdfs/inSiDe_spring2009.pdf
- [21] A. Guttmann, “Sports spectators from antiquity to the renaissance,” *Journal of Sport History*, vol. 8, no. 2, pp. 5–27, 1981.
- [22] Österreichisches Olympiamuseum, “Die antiken Spiele,” 02. August 2012. [Online]. Available: <http://www.oec.at/museum/main.asp?kat1=11&kat2=132&kat3=242&vid=1>
- [23] D. Borchers and J. Kuri, “WM 2006: Fußball ist eine Frage der Technik,” *heise online*, 2006. [Online]. Available: <http://www.heise.de/newsticker/meldung/WM-2006-Fussball-ist-eine-Frage-der-Technik-176141.html>
- [24] “Musterbauordnung - MBO -,” November 2002.
- [25] “DIN EN 13200-1 Zuschaueranlagen - Teil 1: Kriterien für die räumliche Anordnung von Zuschauerplätzen - Anforderungen; Deutsche Fassung,” Deutsches Institut für Normung e.V.; Berlin, Mai 2004.
- [26] “DIN 18065 Gebäudetreppen Definition, Meßregeln, Hauptmaße,” Januar 2000.
- [27] S. Burghardt, “Analyse und vergleichende Untersuchung zum Fundamentaldiagramm auf Treppen,” Master Thesis, Bergische Universität Wuppertal, 2009.

- [28] S. Burghardt, A. Seyfried, and W. Klingsch, "Improving Egress Design through Measurement and Correct Interpretation of the Fundamental Diagram for Stairs," in *Developments in Road Transportation*, M. Panda and U. Chattaraj, Eds. Proceedings of the International Conference on Developments in Road Transportation, October 8-12, 2010, NIT Rourkela, Odisha, India, Macmillian Publishers India Ltd, 2010, pp. 181–187.
- [29] L. Weitekamp, "Vergleich von Personenflüssen an Tribünenausgängen am Beispiel des Borussia-Parks (Mönchengladbach) und der ESPRIT arena (Düsseldorf)," Bachelor Thesis, Bergische Universität Wuppertal, 2012.
- [30] Boltes, M. and Seyfried, A. and Steffen, B. and Schadschneider, A., "Automatic Extraction of Pedestrian Trajectories from Video Recordings," in *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, W. W. F. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, Eds. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, pp. 43–54.
- [31] M. Boltes, A. Seyfried, B. Steffen, and A. Schadschneider, "Using Stereo Recordings to Extract Pedestrian Trajectories Automatically in Space," in *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2010*, 2011, pp. 751–754.
- [32] A. Seyfried and A. Schadschneider, "Empirical Results for Pedestrian Dynamics at Bottlenecks," in *PPAM 2009, Part II*, R. Wyrzykowski, J. Dongarra, K. Karczewski, and J. Wasniewski, Eds. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, pp. 575–584.
- [33] B. Steffen and A. Seyfried, "Methods for measuring pedestrian density, flow, speed and direction with minimal scatter," *Physica A*, vol. 389, no. 9, pp. 1902–1910, May 2010.
- [34] G. M. Voronoi, "Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques," *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, vol. 133, pp. 198–287, 1908.
- [35] H. Frantzych, "Study of movement on stairs during evacuation using video analysing techniques," Department of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology, Tech. Rep., 1996.
- [36] U. Chattaraj, A. Seyfried, and P. Chakroborty, "Comparison of Pedestrian Fundamental Diagram Across Cultures," *Advances in Complex Systems (ACS)*, vol. 12, no. 3, pp. 393–405, 2009.
- [37] S. Buchmueller and U. Weidmann, "Parameters of pedestrians, pedestrian traffic and walking facilities," ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Tech. Rep. Schriftenreihe 132, Juli 2007.
- [38] P. J. DiNenno, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd ed. Quincy MA: National Fire Protection Association, 2002.
- [39] J. A. Templer, *The Staircase: Studies of Hazards, Falls, and Safer Design*, M. I. of Technology, Ed. The MIT Press, 1992.
- [40] X. Chen, J. Ye, and N. Jian, "Relationships and Characteristics of Pedestrian Traffic Flow in Confined Passageways," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2198, pp. 32–40, 2010, doi: 10.3141/2198-05.
- [41] H. Frantzych, "A model for performance-based design of escape routes," Department of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology, Tech. Rep. 1011, 1994.

- [42] E. Graat, C. Midden, and P. Bockholts, "Complex evacuation; effects of motivation level and slope of stairs on emergency egress time in sports stadium," *Safety Science*, vol. 31, pp. 127–141, 1999.
- [43] B. D. Hankin and R. A. Wright, "Passenger Flow in Subways," *Operational Research Quarterly*, vol. 9, pp. 81–88, 1958.
- [44] K. Hoskin, "Fire Protection and Evacuation Procedures of Stadia Venues in New Zealand," Masterthesis, University of Canterbury, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Private Bag 4800, Christchurch, New Zealand, April 2004.
- [45] T. Kretz, A. Grünebohm, A. Kessel, H. Klüpfel, T. Meyer-König, and M. Schreckenberg, "Upstairs walking speed distributions on a long stairway," *Safety Science*, vol. 46, no. 1, pp. 72–78, January 2008.
- [46] S. Seer, D. Bauer, N. Brändle, and M. Ray, "Estimating Pedestrian Movement Characteristics for Crowd Control at Public Transport Facilities," in *11th International IEEE Conference on Intelligent Transport Systems*, October 2008.
- [47] J. Ye, X. Chen, C. Yang, and J. Wu, "Walking Behavior and Pedestrian Flow Characteristics for Different Types of Walking Facilities," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2048, pp. 43–51, 2008, doi: 10.3141/2048-06.
- [48] W. H. K. Lam and C.-y. Cheung, "Pedestrian Speed/Flow Relationships for Walking Facilities in Hong Kong," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 126, pp. 343–349, 2000.
- [49] I. Sadatoshi and K. Koichiro, Eds., *Observation of the Crowd Flow in a Building*, March 1937.
- [50] Y. Tanaboriboon, S. S. Hwa, and C. H. Chor, "Pedestrian Characteristics Study in Singapore," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 112, pp. 229–235, 1986.
- [51] J. Pauls, "Are functional handrails within our grasp?" *Building Standards*, vol. 60, pp. 6–12, 1991.
- [52] J. Pauls, A. J. Gatfield, and E. Juillet, "Elevator use for egress: the human-factors problems and prospects," *Elevator World*, pp. 63–75, 1992, paper for Symposium on Elevators and Fire to be held February 19-20, 1991, in Baltimore, Maryland.
- [53] J. Pauls, "Vertical Evacuation in Large Buildings: Missed opportunities for research," *Disaster Management*, vol. 6, no. 3, pp. 128–132, 1994.
- [54] Pauls, J., "Have We Learned the Evacuation Lessons? A Commentary," *Fire Engineering*, vol. 155, no. 10, pp. 113–122, October 2002.
- [55] J. Pauls, "Photographic representation of visual fields just before missteps and falls involving stairs," in *Contemporary Ergonomics 2005*, P. D. Bust and P. T. Mc Cabe, Eds. Taylor and Francis Books, 2005, pp. 419–423, international Symposium on Slips, Trips and Falls, held as part of the Ergonomics Society 2005 Annual Conference, Hatfield, UK.
- [56] Pauls, J., "Elevators and Stairs for Evacuation: Comparisons and Combinations," *Elevator World*, vol. LIII, no. 1, pp. 69–74, January 2005, proceedings of Workshop on Use of Elevators in Fires and Other Emergencies, American Society of Mechanical Engineers, 2004.

- [57] B. Forell, R. Seidenspinner, and D. Hosser, "Quantitative Comparison of International Design Standards of Escape Routes in Assembly Buildings," in *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, W. W. F. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, Eds. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, January 2010, pp. 791–801. [Online]. Available: <http://www.springer.com/math/applications/book/978-3-642-04503-5>
- [58] C. Rogsch, "Vergleichende Untersuchungen zur dynamischen Simulation von Personenströmen," Diplomarbeit, Bergische Universität Wuppertal, 2005.
- [59] C. Rogsch, A. Seyfried, and W. Klingsch, "Comparative Investigations of the Dynamical Simulation of Foot Traffic Flow," in *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*, N. Waldau, P. Gattermann, H. Knoflacher, and M. Schreckenberg, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 357–362.
- [60] S. Hostikka, T. Korhonen, T. Paloposki, T. Rinne, K. Matikainen, and S. Heliövaara, "Development and validation of FDS+Evac for evacuation simulations - Project summary report," *VTT Technical Research Centre of Finland*, 2007. [Online]. Available: www.vtt.fi/fdsevac/
- [61] D. Helbing and P. Molnár, "Social force model for pedestrian dynamics," *Phys. Rev. E*, vol. 51, pp. 4282–4286, 1995. [Online]. Available: <http://link.aps.org/abstract/PRE/v51/p4282>
- [62] D. Helbing, I. Farkas, and T. Vicsek, "Simulating dynamical features of escape panic," *Nature*, vol. 407, pp. 487–490, 2000.
- [63] D. Helbing, I. J. Farkas, P. Molnar, and T. Vicsek, "Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations," in *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, M. Schreckenberg and S. D. Scharma, Eds. Springer, 2002, pp. 21–58.
- [64] T. Werner and D. Helbing, "The social force pedestrian model applied to real life scenarios," in *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003*, E. R. Galea, Ed. CMS Press, London, 2003, pp. 17–26.
- [65] P. A. Langston, R. Masling, and B. N. Asmar, "Crowd dynamics discrete element multi-circle model," *Safety Science*, vol. 44, no. 5, pp. 395–417, 2006.
- [66] Korhonen, T. and Hostikka, S. and Heliövaara, S. and Ehtamo, H. and Matikainen, K., "Integration of an Agent Based Evacuation Simulation and the State-of-the-Art Fire Simulation," *Proceedings of the 7th Asia-Oceania Symposium on Fire Science & Technology*, 20–22 September 2007.
- [67] T. Korhonen, S. Hostikka, S. Heliövaara, H. Ehtamo, and K. Matikainen, "FDS+Evac: Evacuation Module for Fire Dynamics Simulator," *Proceedings of the Interflam2007: 11th International Conference on Fire Science and Engineering, Interscience Communications Limited*, pp. 1443–1448, 2007.
- [68] Korhonen, T. and Hostikka, S. and Heliövaara, S. and Ehtamo, H., "FDS+Evac: Modelling Social Interactions in Fire Evacuation," *Proceedings of the 7th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, SFPE, Bethesda*, pp. 241–250, 2008.
- [69] T. Korhonen, S. Hostikka, S. Heliövaara, and H. Ehtamo, "FDS+Evac: An Agent Based Fire Evacuation Model," *Proceedings of the 4th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 27–29 February 2008.

Vorveröffentlichungen während des Promotionsstudiums

- **S. Burghardt**, A. Seyfried, and W. Klingsch, «Improving Egress Design through Measurement and Correct Interpretation of the Fundamental Diagram for Stairs», in *Developments in Road Transportation*, M. Panda and U. Chattaraj, Eds. Proceedings of the International Conference on Developments in Road Transportation, October 8-12, 2010, NIT Rourkela, Odisha, India, Macmillian Publishers India Ltd, 2010, pp. 181-187.
- **S. Burghardt**, A. Seyfried, and W. Klingsch, «Fundamental Diagram of Stairs: Critical Review and Topographical Measurements», Proceedings of the International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, June 6-8, 2012, ETH Zürich, Swiss, not published yet.
- **S. Burghardt**, A. Seyfried, and W. Klingsch, «Performance of stairs – Fundamental diagram and topographical measurements», submitted to Transportation Research Part C.

1. **Three-dimensional modelling of soil-plant interactions:
Consistent coupling of soil and plant root systems**
by T. Schröder (2009), VIII, 72 pages
ISBN: 978-3-89336-576-0
URN: urn:nbn:de:0001-00505
2. **Large-Scale Simulations of Error-Prone Quantum Computation Devices**
by D. B. Trieu (2009), VI, 173 pages
ISBN: 978-3-89336-601-9
URN: urn:nbn:de:0001-00552
3. **NIC Symposium 2010**
Proceedings, 24 – 25 February 2010 | Jülich, Germany
edited by G. Münster, D. Wolf, M. Kremer (2010), V, 395 pages
ISBN: 978-3-89336-606-4
URN: urn:nbn:de:0001-2010020108
4. **Timestamp Synchronization of Concurrent Events**
by D. Becker (2010), XVIII, 116 pages
ISBN: 978-3-89336-625-5
URN: urn:nbn:de:0001-2010051916
5. **UNICORE Summit 2010**
Proceedings, 18 – 19 May 2010 | Jülich, Germany
edited by A. Streit, M. Romberg, D. Mallmann (2010), iv, 123 pages
ISBN: 978-3-89336-661-3
URN: urn:nbn:de:0001-2010082304
6. **Fast Methods for Long-Range Interactions in Complex Systems**
Lecture Notes, Summer School, 6 – 10 September 2010, Jülich, Germany
edited by P. Gibbon, T. Lippert, G. Sutmann (2011), ii, 167 pages
ISBN: 978-3-89336-714-6
URN: urn:nbn:de:0001-2011051907
7. **Generalized Algebraic Kernels and Multipole Expansions
for Massively Parallel Vortex Particle Methods**
by R. Speck (2011), iv, 125 pages
ISBN: 978-3-89336-733-7
URN: urn:nbn:de:0001-2011083003
8. **From Computational Biophysics to Systems Biology (CBSB11)**
Proceedings, 20 - 22 July 2011 | Jülich, Germany
edited by P. Carloni, U. H. E. Hansmann, T. Lippert, J. H. Meinke, S. Mohanty,
W. Nadler, O. Zimmermann (2011), v, 255 pages
ISBN: 978-3-89336-748-1
URN: urn:nbn:de:0001-2011112819

9. **UNICORE Summit 2011**
Proceedings, 7 - 8 July 2011 | Toruń, Poland
edited by M. Romberg, P. Bała, R. Müller-Pfefferkorn, D. Mallmann (2011), iv,
150 pages
ISBN: 978-3-89336-750-4
URN: urn:nbn:de:0001-2011120103
10. **Hierarchical Methods for Dynamics in Complex Molecular Systems**
Lecture Notes, IAS Winter School, 5 – 9 March 2012, Jülich, Germany
edited by J. Grotendorst, G. Sutmann, G. Gompper, D. Marx (2012), vi,
540 pages
ISBN: 978-3-89336-768-9
URN: urn:nbn:de:0001-2012020208
11. **Periodic Boundary Conditions and the Error-Controlled
Fast Multipole Method**
by I. Kabadshow (2012), v, 126 pages
ISBN: 978-3-89336-770-2
URN: urn:nbn:de:0001-2012020810
12. **Capturing Parallel Performance Dynamics**
by Z. P. Szebenyi (2012), xxi, 192 pages
ISBN: 978-3-89336-798-6
URN: urn:nbn:de:0001-2012062204
13. **Validated force-based modeling of pedestrian dynamics**
by M. Chraïbi (2012), xiv, 112 pages
ISBN: 978-3-89336-799-3
URN: urn:nbn:de:0001-2012062608
14. **Pedestrian fundamental diagrams:
Comparative analysis of experiments in different geometries**
by J. Zhang (2012), xiii, 103 pages
ISBN: 978-3-89336-825-9
URN: urn:nbn:de:0001-2012102405
15. **UNICORE Summit 2012**
Proceedings, 30 - 31 May 2012 | Dresden, Germany
edited by V. Huber, R. Müller-Pfefferkorn, M. Romberg (2012), iv, 143 pages
ISBN: 978-3-89336-829-7
URN: urn:nbn:de:0001-2012111202
16. **Design and Applications of an Interoperability Reference Model
for Production e-Science Infrastructures**
by M. Riedel (2013), x, 270 pages
ISBN: 978-3-89336-861-7
URN: urn:nbn:de:0001-2013031903

17. **Route Choice Modelling and Runtime Optimisation
for Simulation of Building Evacuation**
by A. U. Kemloh Wagoum (2013), xviii, 122 pages
ISBN: 978-3-89336-865-5
URN: urn:nbn:de:0001-2013032608
18. **Dynamik von Personenströmen in Sportstadien**
by S. Burghardt (2013), xi, 115 pages
ISBN: 978-3-89336-879-2
URN: urn:nbn:de:0001-2013060504

Die Auslegung und Dimensionierung von Rettungswegen im Tribünenbereich beeinflusst maßgeblich den gesamten Räumungsprozess eines Fußballstadions. Um den Fußgängerverkehr auf Tribünen gezielt untersuchen zu können, wurden Experimente unter Laborbedingungen mit bis zu 300 Personen in der ESPRIT arena in Düsseldorf durchgeführt. Ergänzend fanden Feldstudien in demselben Stadion und dem BORUSSIA-PARK in Mönchengladbach statt. Im ersten Teil der Dissertation wird eine umfassende Literaturrecherche zur Fußgängerdynamik auf Treppen präsentiert. Basierend auf präzisen Trajektorien aus den eigenen Experimenten erfolgt die Herleitung des Fundamentaldiagramms. Die räumliche Abhängigkeit der Basisgrößen Geschwindigkeit, Dichte und spezifischer Fluss auf einer Treppe wird analysiert. Verschiedene Auswirkungen auf den Personenfluss und die Dichte im Mundloch – Steh- oder Sitzplatzbereich, unterschiedliche Tribünenneigung, Positionierung von Sicherheitspersonal – werden im zweiten Teil der Arbeit quantifiziert. Aufbauend auf dieser Datenbasis und den gewonnenen Erkenntnissen erfolgt im letzten Teil der Dissertation die Validierung einer Computersimulation. Es wird verdeutlicht, welche Aspekte bei der Validierung eines raumkontinuierlichen Modells zu berücksichtigen sind. Der Vergleich von Simulationsergebnissen mit experimentellen Daten liefert Rückschlüsse auf die Realitätsnähe der verwendeten Software.

Diese Publikation wurde vom Jülich Supercomputing Centre (JSC) herausgegeben, einem Teilinstitut des Institute for Advanced Simulation (IAS). Das IAS vereint Simulationswissenschaften und Supercomputing unter einem Dach. Es umfasst diejenigen wissenschaftlichen Institute des Forschungszentrums Jülich, die Simulationen auf Supercomputern als vorrangigste Forschungsmethode verwenden.